

Ville Vasara

# Servomoottorin testauslaite

Opinnäytetyö  
Sähkötekniikan koulutusohjelma


Marraskuu 2013




**MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU**

Mikkeli University of Applied Sciences

## KUVAILULEHTI

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>	<p><b>Opinnäytetyön päivämäärä</b></p> <p>25.11.2013</p>	
<p><b>Tekijä(t)</b> Ville Vasara</p>	<p><b>Koulutusohjelma ja suuntautuminen</b> <b>Sähkötekniikan koulutusohjelma</b> <b>Sähkövoimatekniikka</b></p>	
<p><b>Nimeke</b> Servomootorin testauslaite</p>		
<p><b>Tiivistelmä</b></p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli rakentaa testilaitteisto servomootorien ja servo-ohjainten testaamiseen. Laitteistosta tuli saada mahdollisimman kompakti, halpa ja sillä piti pystyä testaamaan erikokoisia servomootoreita. Servomootoreiden vääntöä testattiin jarruttamalla niitä 3-vaiheoikosulkumootorilla, jota ajettiin taajuusmuuttajalla samaan suuntaan servojen kanssa pienemmällä nopeudella.</p> <p>Servomootorit olivat yhteydessä oikosulkumootoriin hihnavedolla. Laitteisto koneistettiin 10mm:n pelistä, ja sillä pystyi testaamaan halkaisijaltaan 60-178 mm:n servomootoreita, joiden akselin halkaisija sai olla maksimissa 40 mm. Servoilla oli kiinnityspulttikoot M8 ja M6, joille oli erilliset urat testilaitteistossa.</p> <p>Testilaitteistossa oli myös läpinäkyvästä polykarbonaatista valmistettu suoja hihnalle. Suojan sivut kiinnitettiin toisiinsa kulmarauodoilla. Suoja oli saranoitu, ja sen sai myös kokonaan pois, mikä helpotti hihnan asennusta.</p> <p>Testilaitteistolla testattiin synkronista Siemensin servomootoria ja drivea. Laitteistosta tuli erittäin kompakti ja hintaa rakennukselle tuli hieman vajaa 700 €. Työpaikan laitteeseen antama servodrive ei antanut servomootoreille nopeusohjeita. Laitteeseen tuli myös oikosulkumootori jarruttamaan servomootoria, mutta oikosulkumootorissa ei riittänyt teho jarruttamaan isoja servomootoreja.</p> <p>Tavoitteena oli rakentaa pieni ja toimiva servomootorin testauslaite työpaikan varastosta löytyvillä laitteilla. Servodriven nopeussäätö ei toiminut ollenkaan ja oikosulkumootori jarru ei toiminut isoilla servomootoreilla. Jarrun valintaan en päässyt vaikuttamaan ja servodriven korjaukseen ei jäänyt aikaa. Tehokkaampi oikosulkumootori generaattorina olisi toiminut parempana säädettävänä jarruna servomootoreille.</p>		
<p><b>Asiasanat (avainsanat)</b></p> <p>servotekniikka, sähkömootorit, säätötekniikka</p>		
<p><b>Sivumäärä</b></p> <p>42</p>	<p><b>Kieli</b></p> <p>Suomi</p>	<p><b>URN</b></p> <p><a href="http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013112518196">http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013112518196</a></p>
<p><b>Huomautus (huomautukset liitteistä)</b></p>		
<p><b>Ohjaavan opettajan nimi</b></p> <p>Kohvakka Arto</p>	<p><b>Opinnäytetyön toimeksiantaja</b></p> <p>-</p>	

## DESCRIPTION

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		<b>Date of the bachelor's thesis</b>  25.11.2013
<b>Author(s)</b> Ville Vasara	<b>Degree programme and option</b> Electrical engineering	
<b>Name of the bachelor's thesis</b> Servomotor testing equipment		
<b>Abstract</b>  The objective of the thesis was to built a rig to test servomotors and servomotor drives. The rig was supposed to be as cheap as possible, small and it was supposed to test as many sizes of servomotors as possible. The torque of servomotors was tested by braking them with short circuit motor, which was driven by a inverter at a slower speed than the servomotor.  Servomotors were connected to short circuit motor with a belt drive. The rig was machined from 10mm steel plate and it could house 60-178mm wide servomotors, which had maximum axle width of 40mm. Servos had bolt sizes of M6 and M8 which had separate channels on the rig.  Test rig also had shield for the belt drive that was made from clear polycarbonate. Shields sides were attached together with angle irons. The shield was hinged and removable, which made the belt installation easier.  Rig was used to test synchronous Siemens servomotor and drive.		
<b>Subject headings, (keywords)</b>  servo technology, electric motors, control technology		
<b>Pages</b> 42	<b>Language</b> Finnish	<b>URN</b> <a href="http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013112518196">http://www.urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2013112518196</a>
<b>Remarks, notes on appendices</b>  		
<b>Tutor</b>  Kohvakka Arto	<b>Bachelor's thesis assigned by</b>  -	

# SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	1
2	SERVOMOOTTORI.....	1
2.1	Tasasähkömoottori.....	2
2.2	Asynkroniservomoottori .....	4
2.3	Synkroniservomoottori .....	9
2.4	Anturit.....	12
2.4.1	Inkrementtianturit .....	12
2.4.2	Absoluutti anturi .....	14
2.4.3	Resolverit .....	15
2.5	Servodrivet ja vahvistimet .....	15
3	TAAJUUSMUUTTAJA .....	15
4	PID-SÄÄTÖ.....	16
4.1	P-säätö.....	16
4.2	PI-säätö .....	19
4.3	PID-säätö .....	21
4.4	PD-säädin.....	22
4.5	Säätöjärjestelmän viritys.....	23
4.5.1	Ziegler-Nicholsin askelvastemenetelmä .....	24
4.5.2	Ziegler-Nicholsin värähtelyrajamenetelmä.....	25
5	LAITTEET .....	26
5.1	Oikosulkumoottori.....	26
5.2	Taajuusmuuttaja.....	28
5.3	Kartioholkit.....	29
5.4	Hihna.....	29
5.5	Hihnapyörä .....	30
5.6	Hihnankiristin .....	32
5.6.1	Laakerit .....	34
5.7	Servopenkki .....	35
5.8	Servomoottori .....	36
5.9	Servodrive.....	37
5.10	Suojaukset.....	40
5.11	Pöytä .....	40

6	PÄÄTELMÄT.....	41
---	----------------	----

#### LIITTEET

Liite 1	BCD/Gray-taulukko
Liite 2	Kartioholkki-taulukko
Liite 3	Koneistetun pellin piirustus
Liite 4	Korjattu koneistetun pellin piirustus
Liite 5	Pöytälevy piirustus
Liite 6	Koneistettu pelti Solidworks-piirustus
Liite 7	Testilaitteisto
Liite 8	Pulttikokojen kierteet
Liite 9	Drakaflex H07RN-F 450/750-datalehti
Monisivuinen liite 10	Servomoottori-datalehti

## 1 JOHDANTO

Työpaikalle lähetettiin usein korjaukseen servomootoreita ja servodriveja. Servodrive lukee servon antamat tiedot ja syöttää jännitettä moottorille. Testattavia servoja haluttiin myös jarruttaa jollain tavalla. Jarruksi ehdotin oikosulkumoottoria, jota käytettäisiin generaattorina.

Työpaikan vaatimuksena oli että oikosulkumoottoria ajettaisiin työpaikan varastosta löytyvällä ABB:n taajuusmuuttajalla. Laitteessa piti käyttää servojen ajamiseen työpaikalle joskus kauan aikaa sitten korjaukseen tullutta servodriveä ja invertteriä. Invertterin välipiiriltä otettiin tasajännite servodrivelle.

Servomootorin testipenkillä piti pystyä testaamaan erikokoisia ja erimerkkisiä servomootoreita. Testipenkissä piti käyttää Siemensin servodriveä, jolla pystyi testaamaan myös erimerkkisiä servomootoreita. Testipenkillä pystyi testaamaan myös servodriveja.

Drivemonitor-testiohjelmalla saatiin servodriveltä servomootorin tiedot ulos, kuten esimerkiksi nopeus ja vääntömomentti. Testipenkistä piti saada mahdollisimman kompakti ja halpa.

Servomootorilla pyöritettiin pientä 3-vaiheoikosulkumoottoria, joka toimi jarruna servomootorille. Oikosulkumoottoria ei käytetty generaattorina, vaan moottoria oli tarkoitus pyörittää taajuusmuuttajalla samaan suuntaan servon kanssa pienemmällä nopeudella.

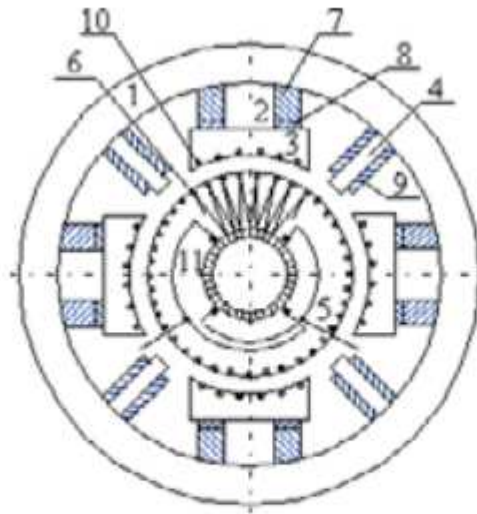
## 2 SERVOMOOTTORI

Servomootoreina voidaan käyttää DC-puolella tasasähkömoottoria tai harjatonta tasasähkömoottoria. Tasasähkömoottorin etuina servokäyttöön ovat tasainen ja stabiili magneettikenttä sekä lineaarinen virran ja momentin välinen riippuvuus./2./

AC-puolella moottorina voidaan käyttää epätahti- ja tahtimoottoria. Epätahtimoottorin jättämän takia moottorin ominaisuudet ovat epälineaariset, mikä hankaloittaa moottorin sovittamista takaisinkytkettyihin järjestelmiin./2./

## 2.1 Tasasähkömoottori

Kuva 1 esittää kaaviollisesti tasasähkökoneen aktiiviset osat, joista ainakin osa on sähköisesti välttämättömiä, jokaiselle tasasähkökoneelle. /3/.



Tasavirtakoneen osat: 1 staattorin kehä, 2 päänavan sydän, 3 napakenkä, 4 kääntönavan sydän, 5 roottorin eli ankkurin rautasydän, 6 roottori- eli ankkurikäänitys, 7 sivuvirtakäänitys, 8 sarjavirtakäänitys, 9 kääntönavan käänitys, 10 kompensointikäänitys, 11 kommutaattori harjoineen.

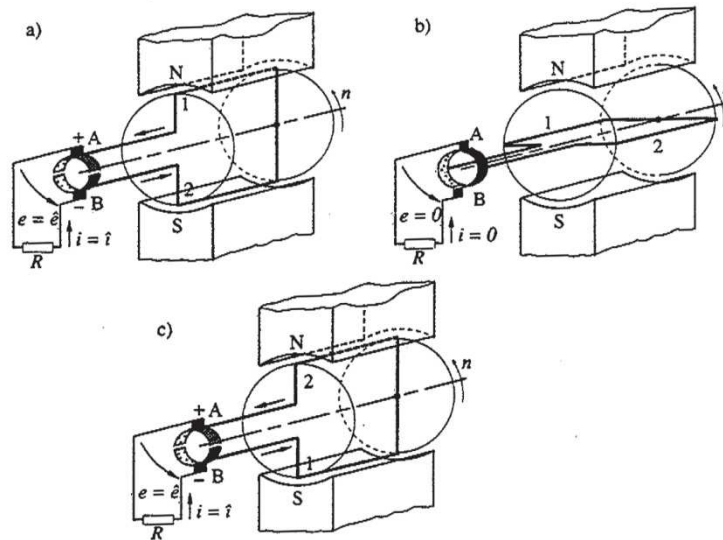
### KUVA 1. Tasavirtakoneen osat /3/

Sivuvirta- ja sarjakäänitysten tehtävänä on synnyttää koneeseen varsinainen magneettikenttä, niin sanottu pääkenttä, siksi näitä käämityksiä nimitetään magneetointikäänityksiksi. Sivuvirtakäänitys kytketään ankkurin kanssa rinnakkain tai liitetään vieraaseen sähkölähteeseen, joten sen resistanssi tehdään suhteellisen suureksi. Tämän takia sen on tehty ohuesta johtimesta, jossa on suhteellisen paljon johdinkierroksia./3./

Sarjakäänitys kytketään sarjaan ankkurin kanssa, joten se magnetoi konetta ankkuri- eli kuormitusvirran avulla. Siinä on suhteellisen vähän johdinkierroksia ja paksu johtimen poikkipinta-ala./3./

Pyörijä- eli ankkurikäänitykseen indusoituu vaihtosähkömotorinen jännite sen pyöriessä magneetointikäänitysten muodostamassa magneettikentässä. Koska indusoitunut

jännite on vaihtojännitettä, niin on se moottoreissa vaihtosuunnattava. Tätä toimenpidettä kutsutaan kommutoinniksi, ja sen suorittaa kommutaattori harjojen kanssa yhdessä. Kommutaattori muodostaa mekaanisen tasa-vaihtosuuntaajan. Ankkurikäimityksen resistanssi on pieni./3./ Kuvassa 2 on kommutaattori, jossa on kaksi liukurengasta, jotka on yhdistetty toisiinsa harjoilla A ja B.



**KUVA 2. Tasavirtakoneen kommutointi /3/**

Kääntönapakäämityksen tehtävänä on saada kommutaattori harjoineen kommutoimaan kipinättömästi, jotta harjat ja kommutaattori pysyisivät kunnossa. Osittain se tätä tehtävää suorittaessaan myös kompensoi ankkurivirran synnyttämää magneettikenttää eli ankkurikenttää. Kääntönapakäämitys on aina kytkettävä ankkurikäimityksen kanssa sarjaan ja napaisuudeltaan oikein. Sen johdinkierrosmäärä on suhteellisen pieni, johtimen poikkipinta-ala suuri ja resistanssi pieni./3./

Kompensointikäimityksen tehtävänä on kompensoida ankkurivirran ankkurikenttää ainakin osittain. Pystyäkseen tähän on se kytkettävä sarjaan ankkurikäimityksen kanssa. Silloin ankkurivirta kulkee sen kautta, joten sen resistanssi on myös suhteellisen pieni./3./

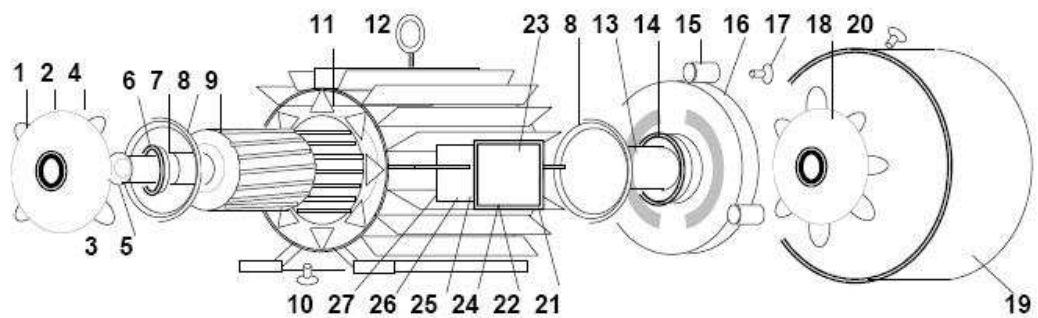
Edellä mainittuja käämityksiä käyttämällä saadaan ominaisuuksiltaan erilaisia tasasähkömoottoreita riippuen siitä, mitä magnetoimiskäämityksiä koneessa on ja miten niitä käytetään./3./



Kun moottori on kytketty, niin muodostuu sen virrallisen roottorin ja magnetointinavan välille voimia. Kommutaattorilla saadaan aikaan se, että kaikissa N-navan johtimissa kulkee virta samaan suuntaan ja samoin kaikissa S-navan johtimissa./3./

## 2.2 Asynkroniservomoottori

Epätahtimoottoriservoja kutsutaan asynkroniservomoottoreiksi. Kuvassa 3 on räjäytyskuva epätahtimoottorista ilman servomoottoriominaisuuksia. /3/Epätahtikoneen toiminnan kannalta tärkeimmät osat ovat staattorin käämitys levypaketteineen ja roottorin käämitys levypaketteineen. Nämä muodostavat koneen sähköisen toiminnan aktiiviset osat. Muut osat ovat passiivisia osia, jotka pitävät aktiiviset osat paikoillaan, johtavat sähköä koneeseen ja välittävät pyörivän liikkeen moottorista./3/



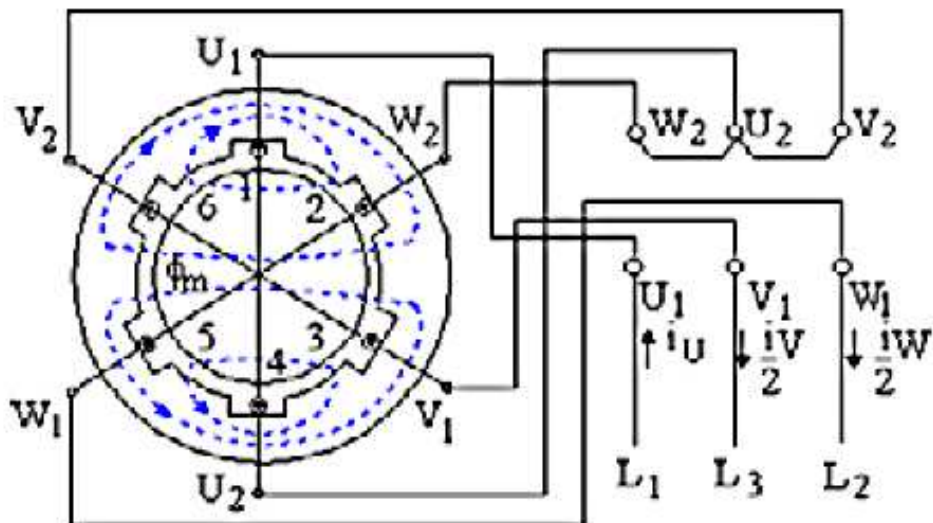
**KUVA 3. Epätahtimoottorin räjäytyskuva /8/**

TAULUKKO 1. Epätahtimoottorin osat /8/

1	Päätykilpi, D-pää	10	Tyhjennystulppa	19	Tuulettimen pesä
2	Voitelunippa	11	Staattorin runko	20	Voitelunippa
3	Rasvanpoisto	12	Nostosilmukka	21	Liitännäboxin kansi
4	Kiinnitysruuvi	13	Sisäpuolinen holkki	22	Kannen tiiviste
5	Suojaussokat	14	Kuulalaakeri	23	Kytkentälevy
6	Kuulalaakeri, D-pää	15	Laakerin tuki	24	Liitännäboxi
7	Laakerin olake	16	Päätykilpi	25	Boxin tiiviste
8	Päätykartio	17	Päätykartion ruuvit	26	Liitännärunko, läpiv.
9	Häkkikämmetty roott.	18	Tuuletin	27	Läpiviennin tiiviste

Epätahtikone on vaihtosähkökone, jonka roottori pyörii eri nopeudella eli epätahdissa staattorikäätymisen aiheuttaman pyörivän magneettikentän kanssa. Epätahtikoneessa pyörivä magneettikenttä kehittyy staattorin symmetrisen kolmivaihekäätymisen ja siinä kulkevan symmetrisen vaihtovirran avulla. /3./

Kuvassa 4 on yksinkertaisin oikosulkumoottorin kolmivaihekäätymis, jossa on vain kuusi uraa eli kaksi uraa vaihetta kohti. Vaihekäämin muodostaa yksi vyyhti, jonka sivu on yhdessä urassa. Käätymis on kytketty tähtikytkentään yhdistämällä vaihekäämien loppupäät  $U_2$ ,  $V_2$  ja  $W_2$  yhteen. Kun vaihekäämien alkupäihin  $U_1$ ,  $V_1$  ja  $W_1$  kytketään kolme vaihetta, niin käätymisen läpi alkaa kulkea kolmivaihevirta. /3./

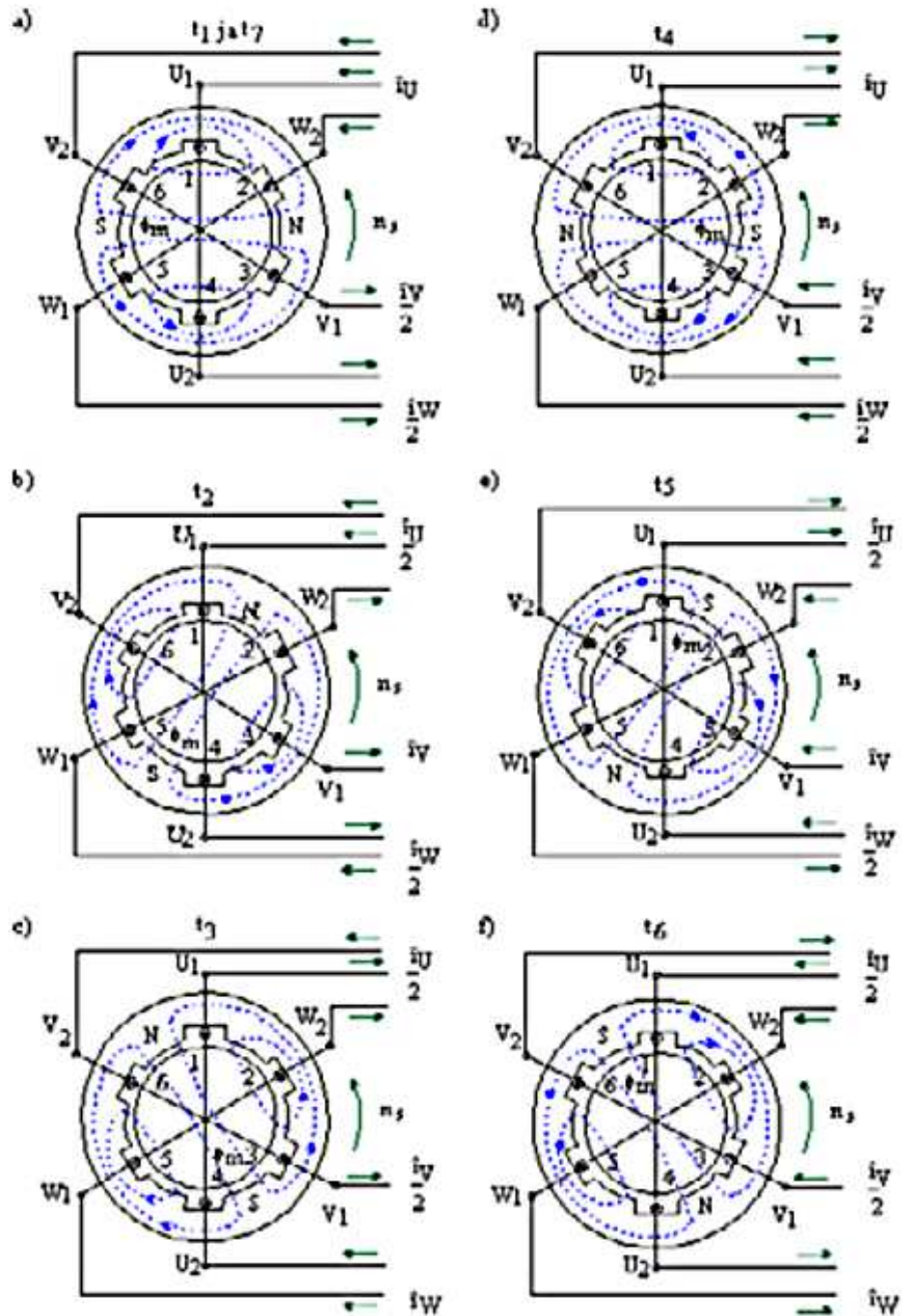


Kuva 4. Epätahtikoneen staattori/3/

Vaihekäämin magnetomotorisen voiman (mmv) huippuarvo lasketaan kaavalla 1, jossa  $N$  = vaihekäämin johdinkierrosmäärä ja  $\hat{I}$  = virran huippuarvo. Käämin mmv on käämissä kulkevan virran kanssa samanvaiheinen. Magneettiirin magneettivastus eli reluktanssi muodostuu pääasiassa pelkästään ilmavälissä ja on mmv:n suuruudesta riippumaton vakio. Magneettivuo  $\varphi_m$  ja magneettivuon tiheys  $b_m$  ovat verrannollisia mmv:n arvoon./3./

$$F_m = N * \hat{I} \quad (1)$$

Kuva 5 esittää kolmivaihekäämityksen synnyttämää pyörivää magneettikenttää. Ajanjaksot on valittu siten, että jokaisella ajanjaksolla jonkin vaihekäämin virta on maksimiarvossaan. Näitä ajankohtia vastaavat magneettikentän suunnat on esitetty kuvassa./3./



**KUVA 5. Staattorin aiheuttama pyörivä magneettikenttä/3/**

Kuvasta voidaan tehdä johtopäätös: Symmetrinen kolmivaihevirta johdettuna symmetrisen kolmivaihekäämitykseen synnyttää koneeseen vakiona pysyvän pyörivän magneettikentän, joka on aina kohtisuorasti sen vaihekäämin tasoa vastaan, jossa virralla on huippuarvo./3./

Koneen tahtinopeus riippuu koneen napapariluvusta  $p$ . Aikaisempien kuvien käämitys kehitti magneettikentän, jossa oli yksi N- ja yksi S-magneettinapa, eli napaluku oli

$2p=2$  eli napapariluku  $p=1$ . Koneen magneettikentän pyörimisnopeus eli tahtinopeus saadaan laskettua kaavalla 2./3./

$$n_s = \frac{f}{p}. \quad (2)$$

Sähkömoottorin toiminta perustuu magneettikentässä olevan virrallisen johdinsilmukan ja magneettikentän väliseen voimavaikutukseen. Kun roottorin johdinsilmukassa vaikuttaa virta  $I$ , se aiheuttaa silmukan ympärille oman magneettikentän. Johdinsilmukan niihin sivuihin, jotka leikkaavat staattorin magneettikenttää vaikuttavat yhtä suuret, mutta vastakkaissuuntaiset voimat  $F$  eli voimapari, joka pyrkii kiertämään silmukkaa. Voima vaikuttaa kohtisuorasti sekä magneettikenttään että virralliseen johtimeen nähden ja sen suunta on resultoivan magneettikentän vahvistavalta puolelta heikentävälle puolelle. Sivuihin vaikuttavat voimat lasketaan kaavalla 3 /3./

$$F = BIl, \quad (3)$$

jossa  $B$ = Seisojan magneettivuon tiheys,  $I$ =Pyörijän silmukan sähkövirta,  $l$ =pyörijän silmukan sivun tehollinen pituus. Vääntömomentti lasketaan akselin suhteen kaavalla 4 ja se on

$$M = 2rF = d * F = d * l * B * I = k * B * I, \quad (4)$$

jossa  $d$ =silmukan halkaisija,  $r$ =silmukan säde,  $F$ =silmukan yhteen sivuun kohdistuva sähködynaaminen voima ja  $k$  on silmukan rakenteesta riippuva vakio.

Sähkömoottorin roottori on varustettu käämityksellä, jossa on monta vyyhteä ja jotka on sijoitetturoottoripaketin ulkopinnalla sijaiseviin uriin. Tällöin magneettikentän voimaviivat ovat kohtisuorassa roottoripintaa vastaan, joten sähködynaaminen voima  $F$ , joka vaikuttaa kohtisuorasti magneettikenttää vastaan, on moottorin ilmvälikehän tangentin suuntainen voima. Moottorissa aiheutuva sähkövääntömomentti lasketaan kaavalla 5 /3./

$$M = \sum_{i=1}^n d * F_i, \quad (5)$$

jossa  $F_i$ =vyyhden sivuun vaikuttava voima,  $d$ =ilmaväliahkaisija,  $n$ =vyyhtien lukumäärä,  $i$ =mielivaltainen vyyhden sivu.

Roottori lähtee pyörimään sähkövääntömomentin vaikutussuuntaan saavuttaen pyörimisnopeuden  $n$ , jolla akseliin vaikuttava mekaaninen vastamomentti kumoaa sähkövääntömomentin  $M$ , siis  $M = M_{mek}$ . Ilmavälissä vaikuttavan sähköisen vääntömomentin  $M$  ollessa vastustavaa vääntömomenttia  $M_{mek}$  suurempi, syntyy kiihdyttävä vääntömomentti./3./

$$M_k = M - M_{mek} \quad (6)$$

Kun sähköinen vääntömomentti voittaa mekaanisen vääntömomentin, lähtee roottori pyörimään magneettikentän pyörimissuuntaan. Roottorin pyörimisnopeuden ollessa  $n$  pyörii roottori magneettikenttää nähden eronopeudella  $\Delta n$  /3./

$$\Delta n = n_s - n, \quad (7)$$

jota nimitetään jättämäksi. Jättämä määritetään yleensä suhteellisenä jättämänä magneettikentän pyörimisnopeudesta eli tahtipyörimisnopeudesta./3./

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Delta n}{n_s} \quad (8)$$

### 2.3 Synkroniservomoottori

Tahtimoottoriservoja kutsutaan synkroniservomoottoreiksi. Tahtimoottori on vaihtosähkökone, jonka roottori pyörii staattorin synnyttämän pyörivän magneettikentän kanssa samassa tahdissa. Tahtikoneen staattorin rakenne on samanlainen kuin epätahtikoneessa, mutta roottorin rakenne on erilainen. Tahtimoottorin roottorissa on kaksi käämitystä, oikosulku- eli häkkikäämitys ja napa- eli magnetointikäämitys./3./

Tahtikoneen roottori on joko umpinaparakenteinen tai avo- eli varsinaparakenteinen. Umpinapapyörää käytetään nopeakäyntisissä tahtikoneissa ja varsinaparakenteista

pyörää hitaissa tahtikoneissa. Staattori ja roottori on rakennettava samalle napaluvulle kuten epätahtikoneissa. /3./

Tahtikoneeseen on synnyttävä tasavirralla magneettikenttä eli päävuoto, joka roottorin mukana pyöriessään indusoi ankkurikäämiin tarvittavan päälähdejännitteen. Magnetoimismenetelmien perusteella jaetaan tahtikoneet harjallisiin ja harjattomiin tahtikoneisiin. /3./

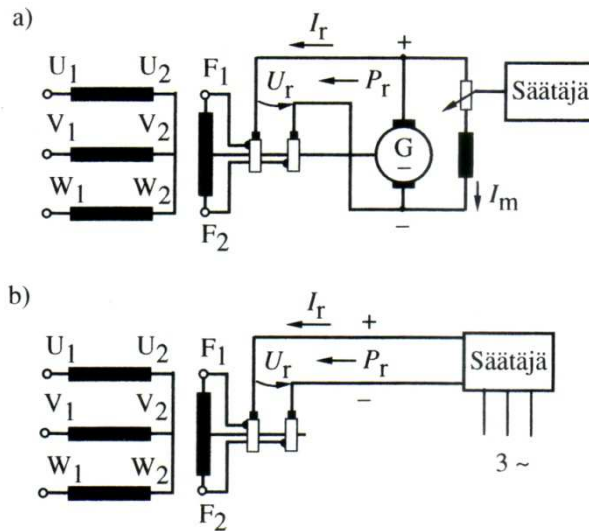
Harjallisissa tahtikoneissa tuodaan magnetoimisvirta  $I_r$  hiiliharjojen ja messingistä tai teräksestä tehtyjen liukurenkaiden avulla pyörivään roottorikäämiin. Näissä harjallisissa koneissa tahtikoneen eli pääkoneen magnetoimisteho on:/3./

$$P_r = U_r I_r \quad (9)$$

jossa  $U_r$ =magnetoimisjännite ja  $I_r$ =magnetoimisvirta. Tasasähkölähteenä voi olla pääkoneen kanssa samalle akselille asennettu magnetointigeneraattori (kuva 6a) tai täysin erillinen tasasähkölähte. /3./

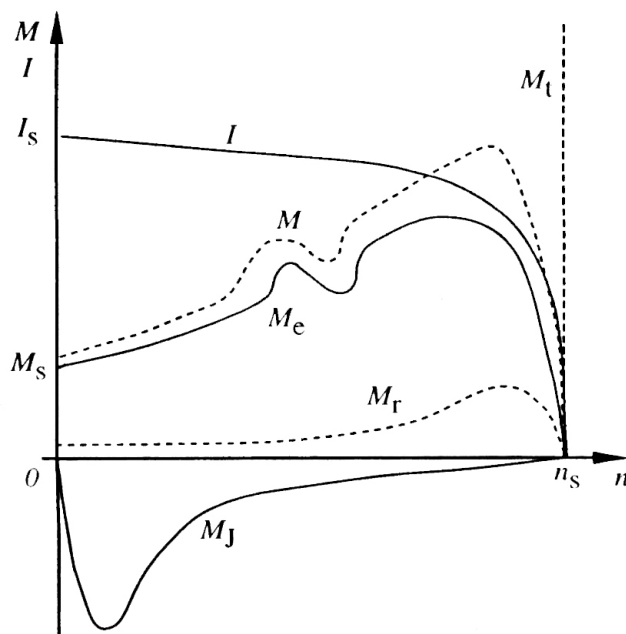
Pääkoneen magnetoinnin säätö tapahtuu magnetointigeneraattorin magnetoimisvirtaa  $I_m$  säätämällä, jolloin magnetointigeneraattorin kehittämä jännite  $U_r$  muuttuu aiheuttaen magnetoimisvirran  $I_r$  säätymisen./3./

Pääkoneen magnetointi voidaan myös ottaa vaihtosähkölähteestä säätäjän kautta, joka säätää ja tasasuuntaa magnetoimisvirran  $I_r$  sopivaan arvoon (kuva 6b). Magnetoinnin teholahteenä voidaan käyttää ulkoista vaihtosähkölähdettä tai itse pääkonetta./3./



**KUVA 6. Tahtikoneen magnetointi/3/**

Tahtimoottori käynnistetään verkkoon oikosulkumoottorina aiheuttaen epätahtimomentin  $M_e$ . Häkkikäimitykseen syntyy erityisesti avonapakoneen ilmavälin magneettisen epäsymmetrian aiheuttama vastakenttä. Vastakenttä muuttaa suuntaansa jättämällä arvolla 0,5, joka aiheuttaa moottorin vääntömomenttikäyrään satulakohdan./3./ Kuvassa 7 on moottorin momenttikäyrä.



**KUVA 7. Moottorin momenttikäyrä/3/**

Mikäli käynnistysvaiheessa napakäämissä kuljisi magneetoimisvirta, niin se aiheuttaisi magneettivuollaan jarruttavan momentin  $M_j$ , joka mahdollisesti estäisi moottoria



käynnistymästä. Kun napakäämi suljetaan käynnistyksen ajaksi ulkoisen resistanssin kautta, se synnyttää oman vääntömomentin  $M_r$ , mikä auttaa käynnistymistä. Kokonaismomentti on /3./

$$M = M_r + M_e \quad (10)$$

Yleensä napakäämin johdinkierrosmäärä on suuri, joten epätahtikäynnissä pyörivä staattorikenttä indusoi magnetointikäämiin hyvin suuren jännitteen, ellei magnetointikäämiä suljeta riittävän pienen resistanssin kautta. Sopiva käynnistysresistanssi saadaan kaavalla 11, jossa  $R_r$ = napakäämin resistanssi./3./

$$R \leq 10 * R_r \quad (11)$$

Roottorin pyöriessä epätahtimomentilla lähellä tahtinopeutta  $n_s$ , kytketään tasavirta napakäämiin. Tällöin napakäämin magneettikentän ja staattorin pyörivän magneettikentän välille syntyy suunnaltaan vaihteleva vääntömomentti. Jos roottorin jättämä on riittävän pieni, pysyy tämä tahdistava vääntömomentti kyllin kauan samansuuntaisena ja roottori vetäytyy tahtiin pyörivän magneettikentän kanssa./3./

## 2.4 Anturit

Servomootoreissa käytetään resolveja, inkrementti- tai absoluuttiantureita paikan ja nopeuden mittaamiseen. Antureissa on pulssikiekko, joka pyöriessä antaa pulsseja laskevalle anturille. Antureina voidaan käyttää magneettista, optista tai johtavaa anturia./2./ Yleisimmin käytetään optista anturia.

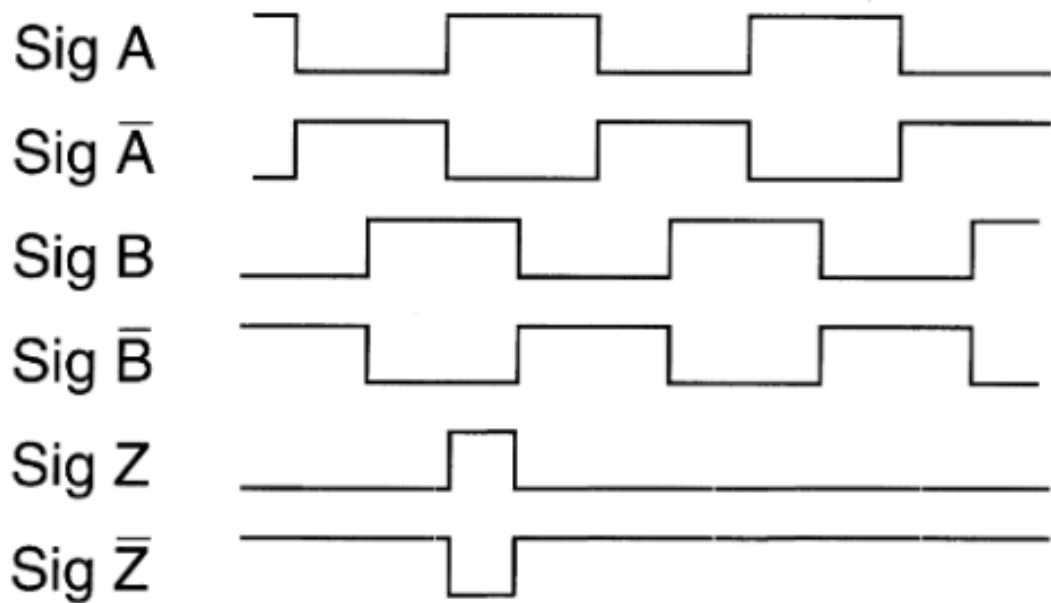
### 2.4.1 Inkrementtianturit

Optisessa inkrementtianturissa on pulssikiekko, valolähde, kiinteä lukulevy ja valoanturi. Pulssikiekossa on tarkka kuvioitu vyöhyke, jossa yhtä leveät kirkaat ja valoa läpäisemättömät sektorit vuorottelevat. Kiinteällä lukulevyllä aiheutetaan ovat 90° vaihesiirto kanavien A ja B välille. Valoanturilla on kaksi (A,B) tai kolme (A,B,Z) kanavaa, joilla tunnistetaan moottorin nopeus ja suunta. /2./

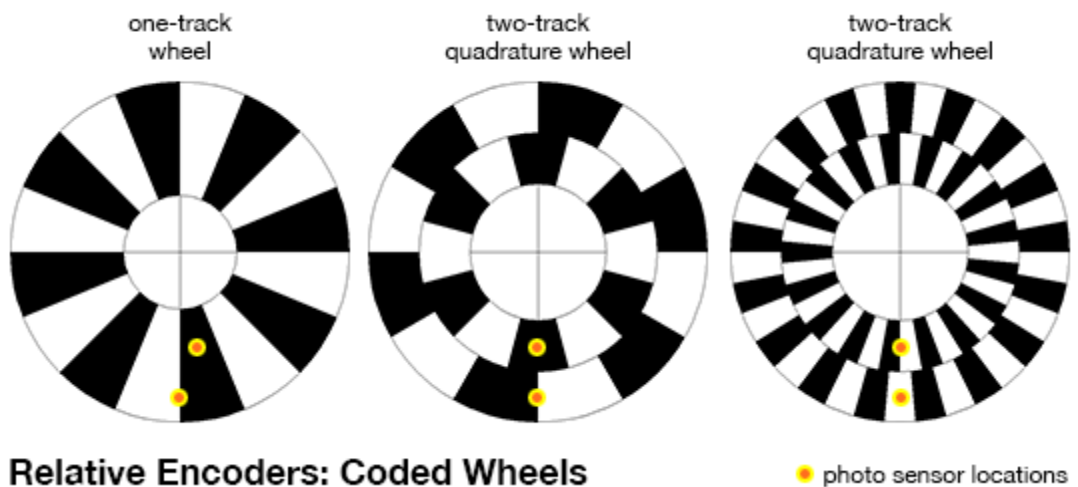
Inkrementtianturin kanavat A ja B ovat 90° vaihesiirrossa toisiinsa nähden ja vaihesiirron suunnasta saadaan selville moottorin pyörimissuunta. Kanava Z on vertailu-

pulssi, joka on omalla vyöhykkeellä. Kanava Z lähettää yhden pulssin kierroksen aikana. Antureiden erotustarkkuus on  $360^\circ$  jaettuna pulssikiekon sektoriparien lukumäärällä. /2./

Kuvassa 8 näkyy anturin antamat pulssit ja kanavien A ja B välinen vaihesiirron mukaan moottori pyörii myötäpäivää. Kanavat  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{Z}$  ovat invertoidut kanavat A, B ja Z. Kuvassa 9 on yksinkertaistettu piirros anturin lukulevystä. Yleensä pulssilevyssä on vain yksi vyöhyke pulsseille ja mahdollisesti toinen vyöhyke tarkistuspulssille.



**KUVA 8. Inkrementtianturin signaali/12/**



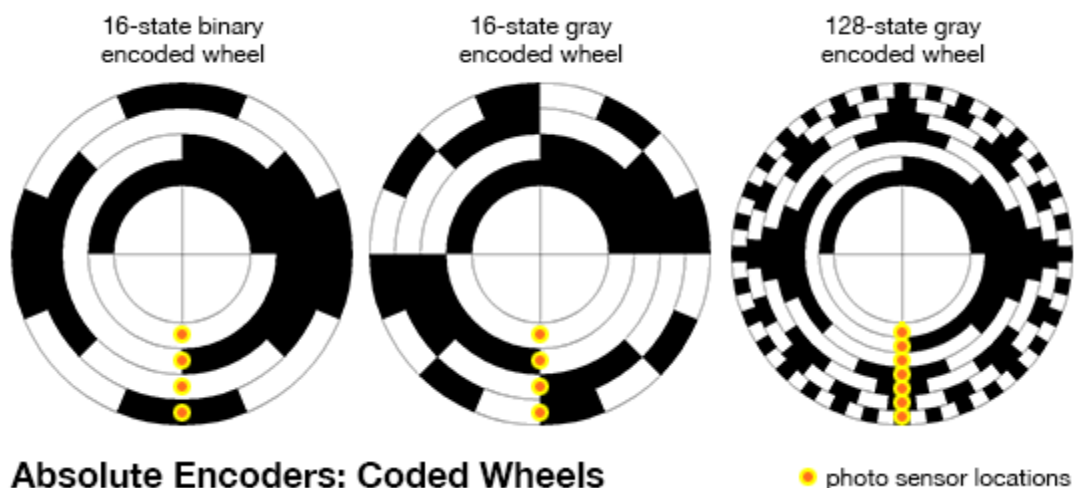
**KUVA 9. Inkrementtianturin pulssikiekko/12/**

Testilevyllä testattu Siemensin servomoottori 1FT6086-1AF71-3AG1 sisälsi optisen anturin B01 2048 S/R. Anturilla oli yhden kierroksen aikana 2048 sektoriparia, eli anturin erotustarkkuus oli  $360^\circ/2048=0,18^\circ$ . Hihnapyörällä, jonka halkaisija on 80 mm, olisi voinut paikoitustiedon ohjata tarkkuudella  $p = \pi * 80 * \frac{0,18}{360} \approx 0,13$  mm.

#### 2.4.2 Absoluutti anturi

Absoluuttianturi antaa nopeuden ja pyörimissuunnan lisäksi paikoitustiedon. Absoluutti anturissa on koodikieppo pulssikiekon tilalla. Absoluuttianturin koodikiekkossa on useita vyöhykkeitä (yleensä 6-12, tarkkuusantureissa jopa 20), joissa on vuorotellen valoa läpäisemättömiä ja läpäiseviä sektoreita. Sektorit luetaan kiekon sädettä pitkin binäärikoodina./2./

Pulssikiekot koodataan BCD-koodilla (Binary Coded Decimal) tai Gray-koodilla. BCD-koodissa desimaaliluvun jokainen numero esitetään erikseen binäärilukuna. Gray-koodissa kaksi peräkkäistä lukua eroaa toisistaan vain yhdellä bitillä. Gray-koodin etuna on luotettava anturin lukeminen, koska tilanmuutoksessa vain yksi bitti muuttuu. /2./ Kuvassa 10 on BCD- ja Gray-koodatut pulssikiekot.



**KUVA 10. Absoluuttianturin pulssikieppo/12/**

Absoluutti antureilla saadaan nopeuden ja suunnan lisäksi myös kulmatieto moottorilta. Kulmatiedon tarkkuus riippuu vyöhykkeiden määrästä. Absoluuttianturit mittaavat moottorin kierrokset inkrementtiperiaatteella, joten sähkökatkoksen aikana moottorin

tieto kokonaisista kierroksista menetetään, mutta kulmatieto absoluuttianturilla pysyy aina./2./

Liitteeseen 1 on kerätty absoluuttianturien desimaaliluvut BCD- ja Gray -koodatuille levyille.

### 2.4.3 Resolverit

Synkrot ja resolverit ovat analogisia asema-antureita, joita käytetään erityisesti vaikeissa ympäristöoloissa. Resolveri asema-anturissa moottorin staattorissa on kaksi erillistä käämiä  $90^\circ$  kulmassa toisiinsa nähden. Roottorissa on yksi tai kaksi käämiä  $90^\circ$  kulmassa toisiinsa nähden. /2./

Roottoriin tai vaihtoehtoisesti toiseen staattorikäämiin syötetään vaihtojännite, joka indusoi staattorikäämeihin tai kahteen roottorikäämiin jännitteet, joista roottorin kiertymäkulman voi ratkaista (resolve) hyvällä tarkkuudella. Tulosignaalin  $\sin w_0 t$  ja lähtösignaalin  $\sin (w_0 t - \beta)$  välisestä vaihe-erosta eli pulssin pituudesta voi laskea moottorin kiertymän./2./

## 2.5 Servodrivet ja vahvistimet

Servomoottorit tarvitsevat driven tai vahvistimen toimiakseen. Servodrivellä ohjataan AC-servomoottoreita ja servovahvistimella DC-servomoottoreita. Testauslaitteella testattiin ainoastaan AC-servomoottoreilla. Servodriveillä otetaan yhteys anturipuoleen ja moottoripuoleen ja jokaiselle servomoottorille pitää antaa oikeat parametrit.

## 3 TAAJUUSMUUTTAJA

Taajuusmuuttajalla muutetaan verkosta syötettävää taajuutta. Taajuusmuuttaja voi olla suora tai epäsuora vaihtosuuntaaja. Suora epäsuuntaaja muuttaa verkon taajuutta tasasuuntaamatta sitä välissä ja sitä kutsutaan syklokonvertteriksi. Tasasuuntaavaa taajuusmuuttajaa kutsutaan invertteriksi. /3./

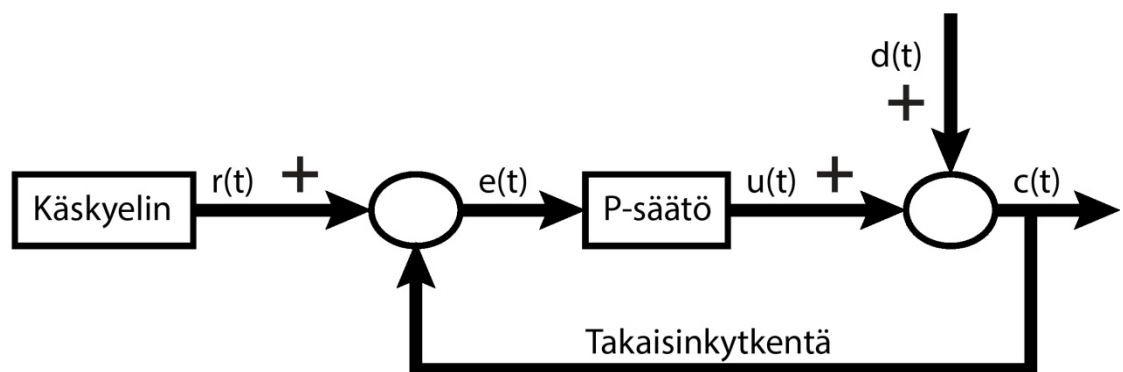
Syklokonvertterilla voidaan kehittää vain vaihtosähköä, jolla on paljon pienempi taajuus kuin syöttävän verkon taajuus. Invertterillä voidaan muuttaa taajuutta enemmän. Syklokonvertteri on erittäin harvinainen./3./

## 4 PID-SÄÄTÖ

PID-säätimellä ohjataan servomoottorien momenttia tai nopeutta. PID-säätimessä P tulee sanasta proportionaalinen, I sanasta integraalinen ja D sanasta derivoiva. PID-säätimessä voidaan käyttää kaikkia lohkoja erikseen tai yhdessä, mutta yleisimmin käytetään PI-säätöä.

### 4.1 P-säätö

Proportionaalinen tarkoittaa suhteellista eli verrannollista. Takaisinkytketyssä säätöjärjestelmässä P-säätö muuttaa toimilaitteelle menevää ohjausviestiä verrannollisesti eroisuureeseen nähden. Kuva 11 esittää P-algoritmilla toteutettua säätöjärjestelmää. /7./



**KUVA 11. Piirros P-säädön takaisinkytkennästä**

Säädettävän järjestelmän mittalaitteelta lähtevä viesti on juuri se säädettävä suure  $c(t)$ , jota pyritään pitämään ohjearvon  $r(t)$  mukaisessa arvossa. Eroelin muodostaa nyt ohjearvon  $r(t)$ :n ja säätösuureen  $c(t)$ :n erotuksen eli eroisuureen  $e(t)$ . Säätölohkosta lähtee järjestelmälle ohjaus  $u(t)$ , johon on liitetty mukaan häiriösuure  $d(t)$ ./7./

Tarkastellaan edellä mainittua säätöjärjestelmää jonkun määrätyn tasapainotilan läheisyydessä. Tämä tarkoittaa sitä, että järjestelmän ohjaus  $u(t)$  ja säädettävä lähtösuure

$c(t)$  pysyvät vakioina eli eivät muutu ajan suhteen. Eroelimelle tuleva säätösuure  $r(t)$  on yhtä suuri kuin säätösuure  $c(t)$ . Häiriön  $d(t)$  oletetaan olevan nolla. /7./

Tällaisessa tilanteessa minkään säädön ei tule muuttaa ohjausta, koska kaikki toimii niin kuin pitää. Merkitään nyt tämän tasapainotilan suureiden arvot nollassi. Tämän nollassi skaalaamisen jälkeen kyseiset suureet ilmaisevat poikkeamia edellä esitetyn tasapainotilan arvoista. Poikkeamat tasapainotilan arvoista pysyvät nollassi, kunnes joko ohjearvoa muutetaan tai häiriö alkaa vaikuttaa. P-algoritmi määrittellään tasapainotilan poikkeamille seuraavasti:/7./

$$u(t) = K_P e(t), \quad K_P \neq 0, K_P \in R \quad (12)$$

Ohjaus  $u(t)$  on nyt suoraan verrannollinen eli proportionaalinen erosuureen  $e(t)$  arvoon. Kerroin  $K_P$  on P-säädön viritysparametri, ja sitä sanotaan vahvistukseksi. Se voi olla myös negatiivinen, jolloin puhutaan inverttoivasta P-säädöstä. Merkitään se hetki nollassi ( $t=0$ ), jolloin ohjearvoa muutetaan askelmaiseksi. /7./

$$r(t) = c(t) = 0, (t < 0) \quad (13)$$

$$e(t) = r(t) - c(t) = 0, (t < 0) \quad (14)$$

$$u(t) = K_P e(t) = 0, (t < 0) \quad (15)$$

Mikäli ohjearvoa muutetaan ylöspäin hetkellä  $t = 0$ , muuttuvat suureet seuraavasti:/7./

$$r(t) = r_0, (r_0 > 0, t \geq 0) \quad (16)$$

$$e(0) = r(0) - c(0) = r_0 \quad (17)$$

$$u(0) = K_P e(0) = K_P r_0 > 0 \quad (18)$$

Kaavoista nähdään, että säätösuure ei järjestelmän aikavakioista johtuen ole vielä muuttunut ollenkaan, mutta ohjaus saa heti järkevän nollassi poikkeavan arvon. Ohjausmuutoksen suuruus riippuu P-säädön vahvistuksesta  $K_P$ , mitä suurempi vahvistus, sitä voimakkaammin ohjausta lisätään. Ajalla  $t > 0$  päädytään seuraavaan tilanteeseen:/7./

$$r(t) = r_0 \quad (19)$$

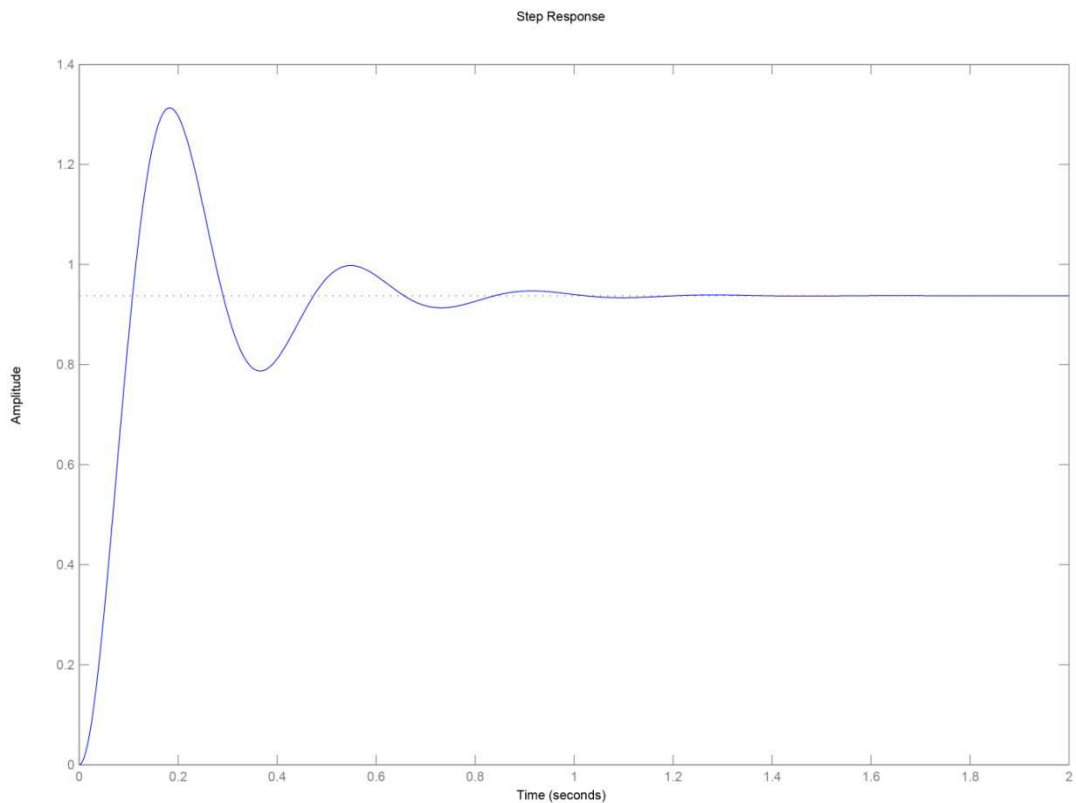
$$c(t) = c_p, (c_p < r_0) \quad (20)$$

$$e(t) = r_0 - c_p > 0 \quad (21)$$

$$u(t) = K_p e(t) = K_p (r_0 - c_p) > 0 \quad (22)$$

Edellä olevista kaavoista huomataan, että säätösuureen arvo jää pienemmäksi kuin ohjearvo eli säätöjärjestelmään jää pysyvä säätöpoikkeama. Tämä onkin selvää, koska säätösuureen muuttaminen vaatii aina ohjaukseen nolasta poikkeavan erosuureen./7./

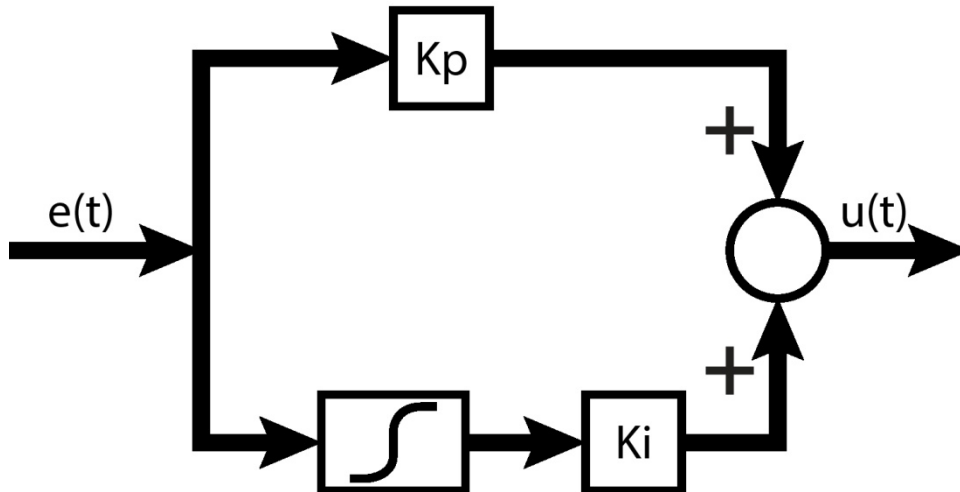
Säätöpoikkeama jää sitä pienemmäksi, mitä suuremmaksi  $K_p$  viritetään, mutta liian suuri vahvistus aiheuttaa säätöjärjestelmässä liiallista värähtelyä ja epästabiiliutta./7/. Kuvassa 12 on P-säätö  $K_p$  vahvistusarvolla 300 ja tavoitearvo säädössä on 1. Kuvasta näkyy että ohjaussignaali jää värähtelemään ja signaali jättää erosuureen.



**KUVA 12. Matlab P-säätö**

## 4.2 PI-säätö

Jotta saataisiin sellainen säätöalgoritmi, joka poistaisi säätöpoikkeaman kokonaan äärellisessä ajassa, tarvitaan P-säätöön jokin lisätermi. Tämän termin tulee jäädä nol-  
lasta poikkeavaksi silloin, kun erosuure asettuu nolaksi. Tällainen termi on erosu-  
ureen aikaintegraalista riippuva termi, joka voidaan kirjoittaa muotoon./7./ Kuvassa 13  
on PI-algoritmin lohkokaavio.



KUVA 13. PI-algoritmin lohkokaavio

$$K_I \int_0^t e(t) dt, \quad K_I \geq 0, K_I \in R \quad (23)$$

Oletetaan säätöjärjestelmän olevan tasapainotilassa. Tasapainotilassa erosuure  $e(t) = 0$ . Välittömästi kun erosuure saa nolasta poikkeavan arvon, alkaa integroiva termi laskea erosuureen ja positiivisen aika-akselin väliin jäävää pinta-alaa kumulatiivisesti yhteen. /7./

Näin laskettava pinta-ala voi jäädä nolasta poikkeavaksi siinäkin tapauksessa, jossa itse erosuure  $e(t)$  pienenee nolaksi. Tämä merkitsee sitä, että integroivan tekijän sisältämä säätöalgoritmi mahdollistaa ohjaukseen  $u(t)$  nettolisäyksen silloin, kun erosuure on nolla./7./

Muuttamalla integrointikertoimen  $K_I$ -arvoa voidaan vaikuttaa integroivan termin osuuteen säätöalgoritmissa. Usein integrointitermi ilmoitetaan integrointi-aikavakion-



$T_I$  avulla, joka ilmaisee karkeasti sen ajan, jonka kuluessa syntynyt säätöpoikkeama poistetaan. PI-säätöalgoritmi voidaan kirjoittaa muotoon:/7./

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt, \quad K_P \neq 0, K_I \geq 0, K_P, K_I \in R \quad (24)$$

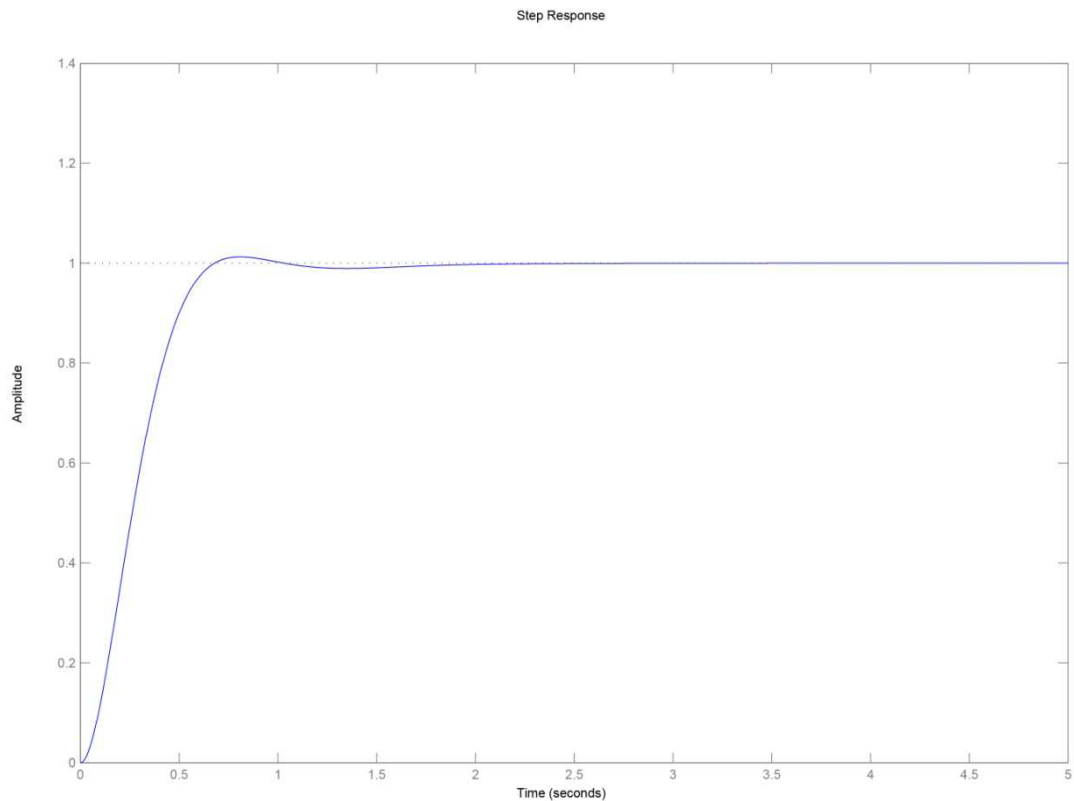
Integrointiaikavakiota  $T_I$  käyttämällä saadaan

$$u(t) = K_P \left( e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \right), \quad K_P \neq 0, T_I > 0, K_P, K_I \in R \quad (25)$$

$$T_I = \frac{K_P}{K_I} \quad (26)$$

Pienemmällä  $T_I$ -arvolla säätöpoikkeama häviää nopeammin.  $T_I$ -arvolla nolla aiheuttaisi ohjaukselle  $u(t)$  äärettömän suuren arvon, joka johtaisi järjestelmän epästabiiliin värähtelyyn samalla tavalla kuin liian suuri  $K_P$ -vahvistus. Integrointiaikavakion yksikkö on aikayksikkö./7./

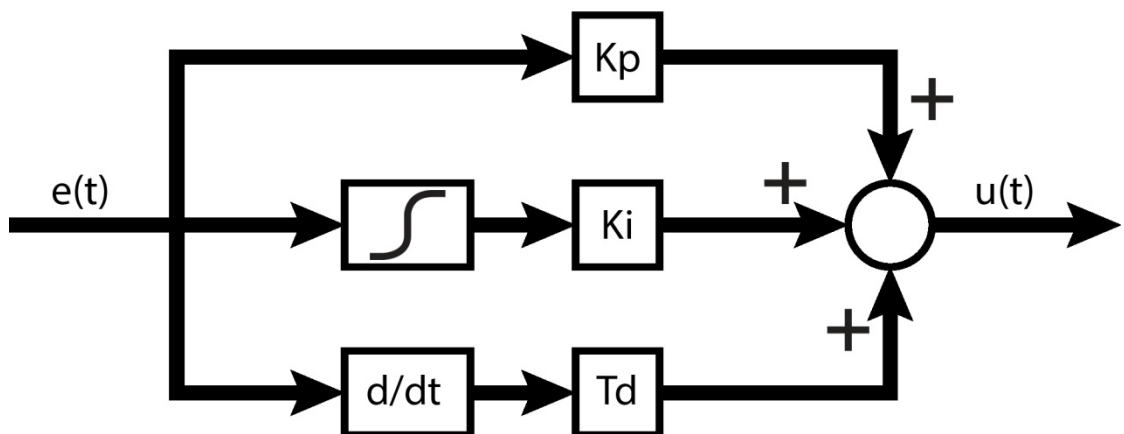
Kuvassa 14 on PI-säätö  $K_P$ :n arvolla 30 ja  $K_I$ :n arvolla 70. Kuvassa näkyy, että ohjussignaaliin ei jää erosuuretta, vaan amplitudi tasoittaa arvoon 1.



**Kuva 14. Matlab PI**

### 4.3 PID-säätö

Usein esiintyy tilanteita, joissa säädöltä vaaditaan erittäin voimakasta ja välitöntä reagoitua säätöpoikkeamaan. Esimerkiksi, jos mittausjärjestelmä on aikavakioiltaan hidas verrattuna itse säädettävään ja/tai jos mittauksessa esiintyy viivettä, niin muutokset tapahtuvat myöhässä. Tällöin säädön pitää ottaa ennakkoo ja ohjata hyvin voimakkaasti järjestelmää oikeaan suuntaan./7/ Kuvassa 15 on PID-algoritmin lohkokaavio.



KUVA 15. PID-algoritmin lohkokaavio

Ennakointi voidaan toteuttaa lisäämällä säätöalgoritmiin derivoiva termi, joka muuttaa säätimeltä lähtevää ohjausta  $u(t)$  suhteessa erosuureen  $e(t)$  aikaderivaattaan eli muutosnopeuteen./7/.

$$K_D \frac{d}{dt} e(t), \quad K_D \geq 0, K_D \in R \quad (27)$$

Mikäli derivoiva termi lisätään PI-algoritmiin, niin saadaan säätö, joka reagoi nopeasti ja poistaa säätöpoikkeaman kokonaan. Näin syntynyt PID-algoritmi voidaan kirjoittaa muotoon./7./

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t), \quad K_P \neq 0, K_I \geq 0, K_D > 0 \quad (28)$$

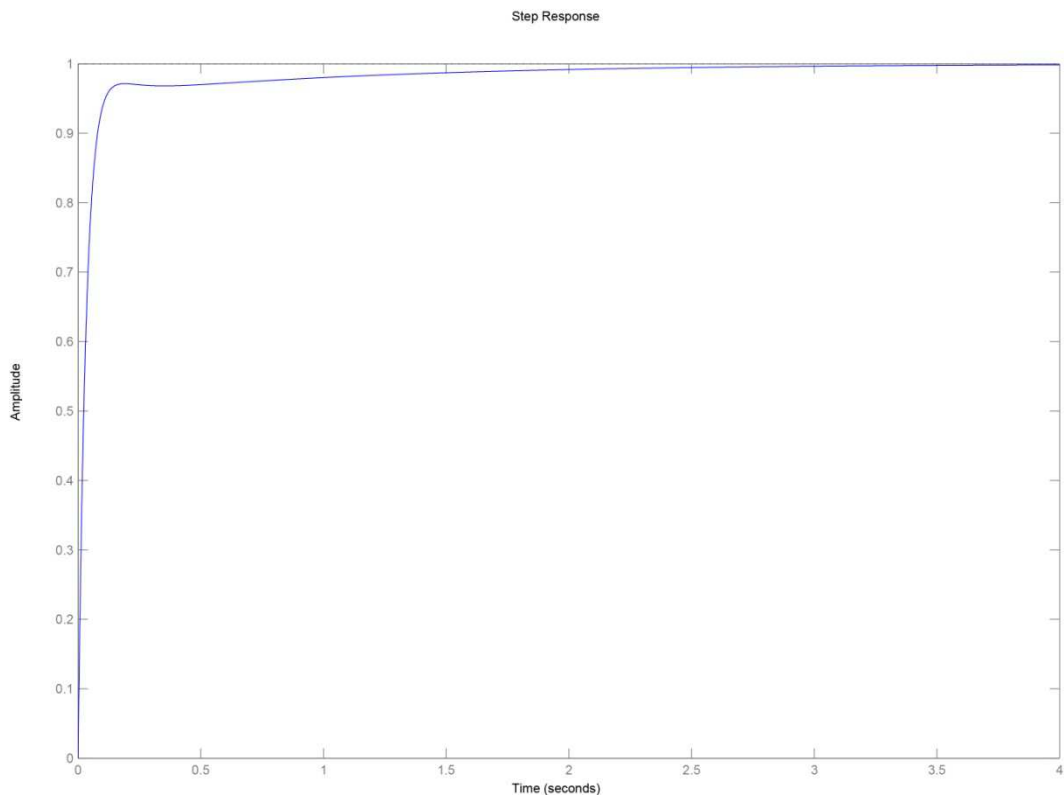
,josta edelleen saadaan toinen yleisesti käytetty muoto.

$$u(t) = K_P \left( e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{d}{dt} e(t) \right), \quad K_P \neq 0, T_I > 0, T_D \geq 0 \quad (29)$$

$$T_I = \frac{K_P}{K_I}, \quad T_D = \frac{K_D}{K_P} \quad (30)$$

Derivointitermin kerrointa  $T_D$  kutsutaan derivointiaikavakioksi, ja se ilmaisee karkeasti sen ajan, jonka kuluessa säätö saa eräänlaista lisävahvistusta nopean erosuuremuutoksen tapahduttua. Jos erosuuremuutokset ovat hitaita, on derivointitermin vaikutus vähäistä. Derivointiaikavakion yksikkö on aikayksikkö./7./

Kuvassa 16 on PID-säätö  $K_p$ :n arvolla 300,  $K_i$ :n arvolla 250 ja  $K_d$ :n arvolla 30. Kuvan ohjaussignaali nousee nopeasti tavoitearvoonsa, ei jää värähtelemään eikä jätä erosuuretta.



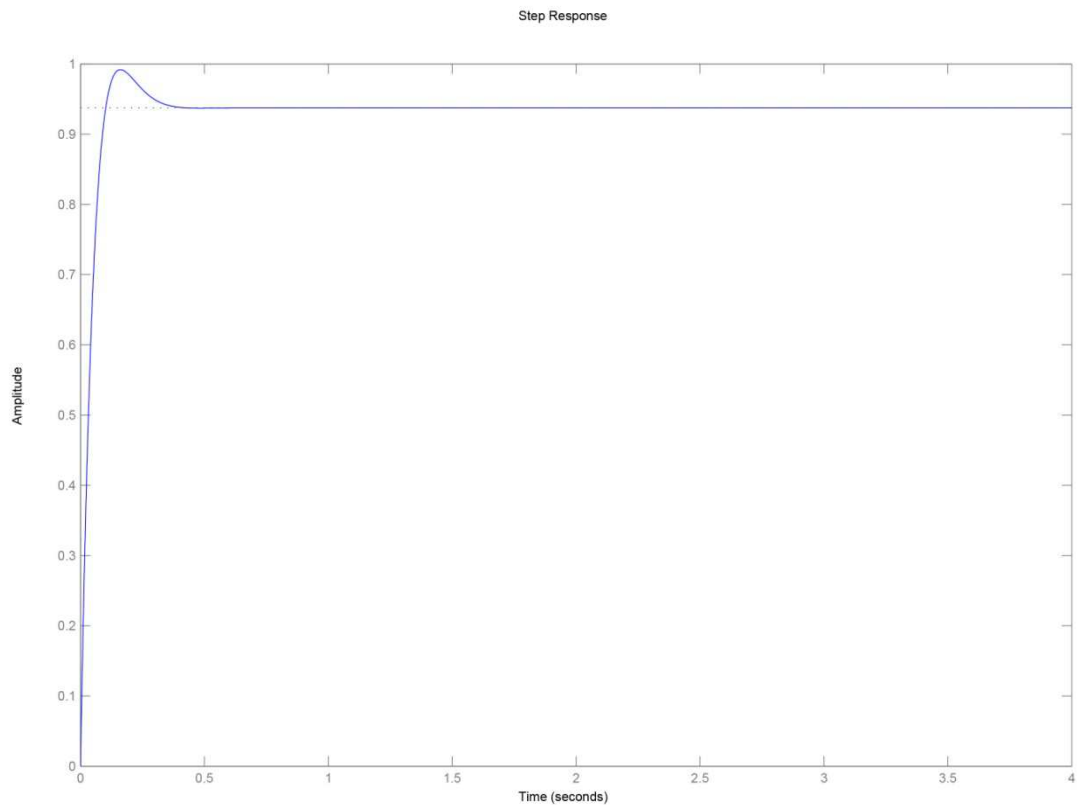
**KUVA 16. Matlab PID**

#### 4.4 PD-säädin

PD-säädintä käytetään puutteellisen tarkkuutensa takia harvoin säätimenä. PD-säädin ei voi poistaa P-säätimen aiheuttamaa säätöpoikkeamaa. Silloin kun säädettävän järjestelmän täytyy vastata prosessissa tapahtuvista muutoksista, on D-säätimestä apua,

koska se tunnistaa muutoksen suunnan ja siten ennalta korjaa prosessiin menevää ohjausarvoa. /7./

Kuvassa 17 on PD-säädin  $K_p$  arvolla 300 ja  $K_d$  arvolla 20. Säätö jättää erosuureen ja derivoiva termi tasoittaa P-lohkon huippuja. PD-säätimellä voidaan korvata PID-säädin silloin, kun siihen liitettävä prosessi on integroiva.



**KUVA 17. Matlab PD**

#### 4.5 Säätöjärjestelmän viritys

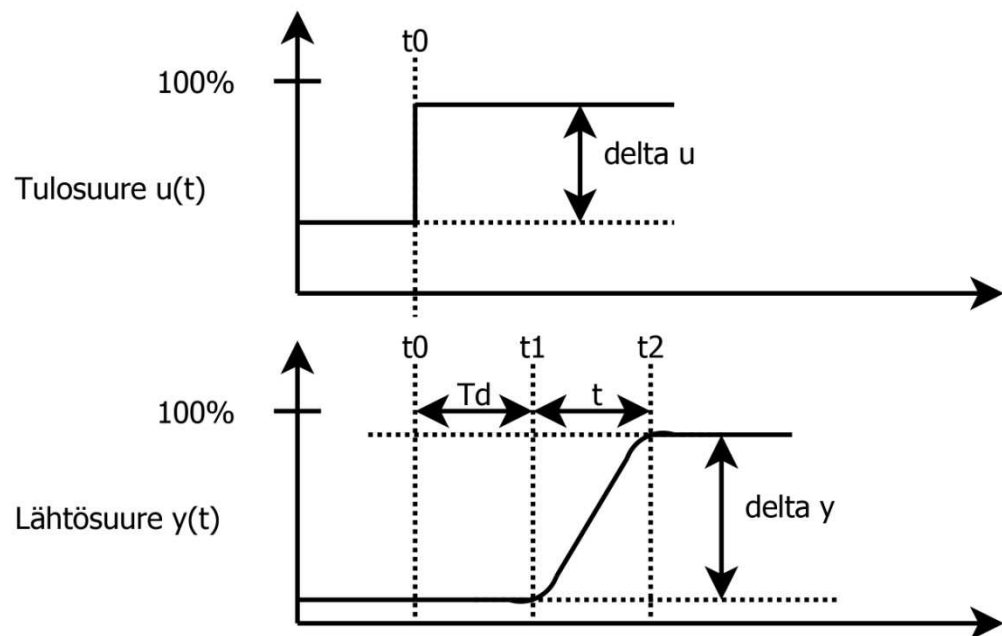
Hyvässä säätöjärjestelmässä ei saa esiintyä liiallista värähtelyä, ja säätöpoikkeaman tulisi olla mahdollisimman pieni. Näillä perusteilla voidaan lähteä viritämään järjestelmää kokeilemalla eri suuria parametriarvoja. Tämä onnistuu kohtuullisesti P-säädön osalta, onhan siinä vain yksi viritettävä parametri. Sen sijaan PI- ja PID-säädössä tulee jo melkoisia vaikeuksia. /7./

Aikaisempia säätöjä ei ollut kunnolla viritetty, että niistä näkyisi selvemmin säätimien eroavaisuudet. Matlabissa on myös automaattisäätö PID-säätimelle, jolla saa paremmat säätöarvot helpommin.

### 4.5.1 Ziegler-Nicholsin askelvastemenetelmä

Ziegler-Nicholsin askelvastemenetelmässä tehdään säädettävälle järjestelmälle täydellinen askelvastekoe eli määrättyssä tasapainotilassa tehdään järjestelmän ohjaukseen askelmainen muutos ja talletetaan järjestelmän käyttäytyminen. /7/.

Koe tulee tehdä sellaisen tasapainotilan läheisyydessä, jossa järjestelmä normaalisti toimii. Askelvastekokeesta määritellään arviot määräävälle aikavakiolle  $t$  ja viiveelle  $T_d$  kuvan 18 mukaisesti.



**KUVA 18 Säätimen tulosuure ja lähtösuure.**

Tämän lisäksi askelvastekokeesta määritetään säädettävän järjestelmän suhteellinen vahvistuskerroin  $\Delta y/\Delta u$ . Säättöjen viritysparametrien arvot voidaan laskea:/7./

P-säätö:

$$K_P = \frac{t}{T_d} * \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (31)$$

PI-säätö:

$$K_p = 0,9 \frac{t}{T_d} * \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (32)$$

$$T_I = 3T_d \quad (33)$$

PID-säätö:

$$K_P = 1,2 \frac{t}{T_d} * \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (34)$$

$$T_I = 2T_d \quad (35)$$

$$T_D = 0,5T_d \quad (36)$$

Kun viritysparametrit on laskettu, tulee virityksen onnistuminen tarkastaa. Tämä voidaan tehdä siten, että kytketään järjestelmä automaattisäädölle ja tehdään ohjearvoon pieniä muutoksia alkuperäisen tasapainotilan läheisyydessä./7./

Käytännön säätöjärjestelmää pitää vielä hienosäätää hyvän säätötuloksen aikaansaamiseksi, usein riittää pelkän vahvistuksen muuttaminen. Jos säätösuureessa esiintyy liiallista värähtelyä(ylivireinen säätö), niin pienennetään vahvistusta. Jos säätösuureessa ei esiinny mainittavaa värähtelyä ja samanaikaisesti säätösuureen asettuminen ohjearvoonsa kestää kauan(alivireinen säätö), niin voidaan vahvistusta hieman kasvattaa. Ziegler-Nicholsin mukaisessa hyvässä vireessä olevan säädön värähtely vaimenee neljännekseen yhden jakson aikana./7./

Ellei vahvistuksen hienovirittäminen riitä, niin voidaan yrittää muuttaa integrointi- ja derivointiaikavakioita. Integrointiaikavakion pienentäminen nopeuttaa säätösuureen asettumista ohjearvoonsa, samalla kuitenkin värähtely yleensä lisääntyy. Derivointiaikavakion kasvattaminen nopeuttaa säätöä äkkinäisissä muutostilanteissa, mutta liian suuri derivointiaikavakio aiheuttaa värähtelyä. /7./

#### 4.5.2 Ziegler-Nicholsin värähtelyrajamenetelmä

Värähtelyrajaperiaatteessa ohjataan järjestelmä ensiksi käsiohjauksella haluttuun tasapainotilaan, jossa järjestelmä normaalistikin toimii. Viritetään säätö P-säädöksi eli asetetaan integrointiaikavakio  $T_I$  äärettömäksi tai ainakin mahdollisimman suureksi ja derivointiaikavakio  $T_D$  nolaksi. Vahvistus  $K_P$  kannattaa valita melko pieneksi. /7./

Tämän jälkeen kytketään järjestelmä automaattisäätöön ja tehdään ohjearvoon pieni edestakainen muutos, jotta säätö lähtisi toimimaan. Jos järjestelmän säätösuureessa ei esiinny värähtelyä, niin kasvatetaan vahvistusta  $K_P$ . Vahvistusta muuttamalla pyritään

etsimään kriittistä värähtelyä eli sellaista tilaa, jossa säätösuure värähtelee vakioamplitudilla. /7./

Sitä vahvistuksen arvoa, jolla säätöjärjestelmä värähtelee vakioamplitudilla, sanotaan säätöjärjestelmän kriittiseksi vahvistukseksi  $K_{Pkr}$  ja vastaavan värähtelyn jaksonpituutta sanotaan kriittiseksi jaksonpituudeksi  $T_{kr}$ . Kriittisen vahvistuksen ja kriittisen jaksonpituuden avulla voidaan laskea viritysparametrit./7./

P-säätö:

$$K_P = 0,5K_{Pkr} \quad (37)$$

PI-säätö:

$$K_P = 0,45K_{Pkr} \quad (38)$$

$$T_I = 0,83K_{Pkr} \quad (39)$$

PID-säätö:

$$K_P = 0,6K_{Pkr} \quad (40)$$

$$T_I = 0,5K_{Pkr} \quad (41)$$

$$T_D = 0,125T_{kr} \quad (42)$$

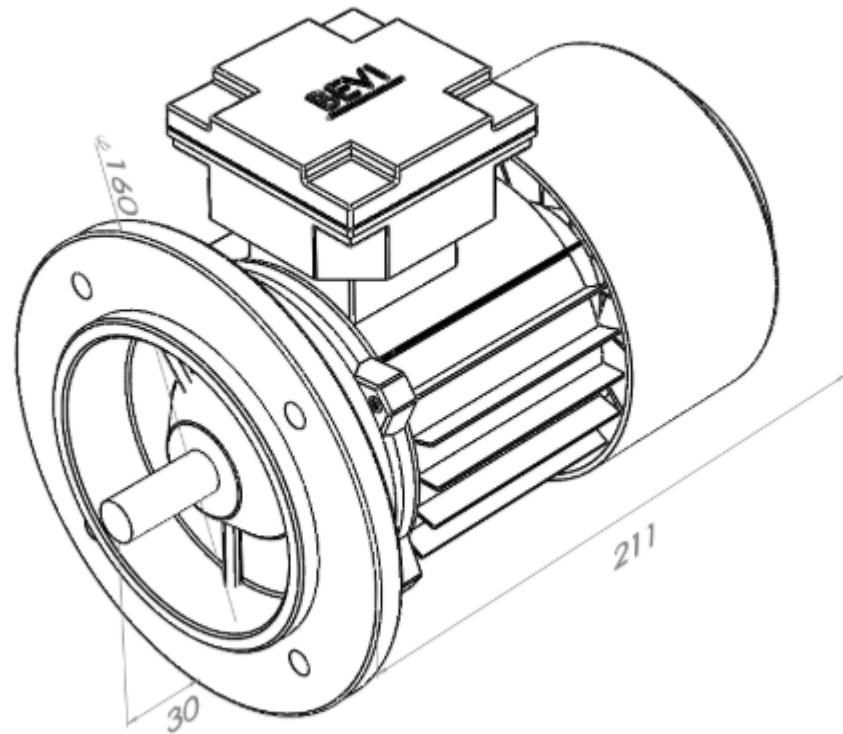
Näin laskettujen viritysparametrien arvojen pitäisi olla lähes samat kuin askelvastemenetelmällä saatujen arvojen. Myös hienoviritykseen pätevät samat periaatteet kuin askelvastemenetelmään./7./

## 5 LAITTEET

Servomootorin testauslaitteeseen kuului kartioholkit, hihnankiristin, moottorit, taa-juusmuuttaja ja drivet. Pöytä ei koskaan valmistunut, koska paikallisessa puutavara-liikkeessä oli saha rikki.

### 5.1 Oikosulkumoottori

Taajuusmuuttajalla ohjattiin oikosulkumoottoria, jolla oli tarkoitus jarruttaa servoja. Moottorina käytettiin Bevi merkkistä SKh 71-2B 3-vaiheoikosulkumoottoria, josta on piirros kuvassa 19. Moottori kytkettiin tähteen. Moottorin kilpiarvot näkyvät taulukossa 2.



**KUVA 19. Solidworks-piirros käytetystä oikosulkumoottorista.**

**TAULUKKO 2. Moottorin kilpiarvot**

kw	Hz	V	A	Rpm
0,55	50	220-240D	2,35-2,56	2790
	50	380-420Y	1,35-1,47	
0,64	60	440-480Y	1,35-1,47	3350
IP 55		Cosφ 0.82		

Moottorin akseli oli 14 mm halkaisijaltaan, ja se tuli vain 10 mm yli servotestipenkin 10 mm pellistä, joka riitti kyllä pitämään kartioholkin kiinni akselissa, mutta vaikeutti kartioholkin laittamista./5/ Akselissa oli kiila mukana, joten jos kartioholkin olisi saanut pohjaan ja sen olisi vääntänyt 20 Nm:n momenttiin, niin se olisi kestänyt 407 Nm vääntöä./5/

Kytkenäjohtona käytettiin DRAKAFLEX H07RN-F 4\*2,5 kaapelia, koska sitä löytyi varastosta. Kaapelissa ei ollut suojakuorta, eikä se täyttänyt taajuusmuuttajan vaati-



muksia. /1/Taajuusmuuttajan manuaalin mukaan moottorikaapelin ulkoisella suoja-kalvolla tulee olla yhtä suuri halkaisija kuin kaapelin johtimilla ja johtavuuden tulee olla vähintään 1/10 johtimen johtavuudesta. /1/ Liitteessä 9 on käytetyn kaapelin da-talehti.

## 5.2 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajana käytettiin aluksi ABB:n ACS310 taajuusmuuttajaa, joka vaihdet-tiin myöhemmin ABB:n ACS510:ksi. ACS310 taajuusmuuttaja antoi oikosulkumoot-torille vain 0,4 A virtaa servomoottorin jo pyöriessä ja ei saavuttanut lopullista no-peuttaan. Taajuusmuuttaja kyykkäsi heti servon käynnistyttyä, joten se vaihdettiin ABB:n ACS510:ksi.

ACS510-taajuusmuuttajassa riitti teho pyörittämään moottoria servon pyöriessä, mutta moottori ei saavuttanut servon nopeutta kohtuullisilla virroilla. Taajuusmuuttajaa ajet-tiin skalaarisäädöllä.

Vektorisäädön jarrutusominaisuuksia kokeiltaessa taajuusmuuttaja antoi ylinopeus virheilmoituksen. Vektorisäädöllä moottorin sai pysähtymään vuo-jarrutuksella tai DC-jarrulla, mutta vektorisäädöllä taajuusmuuttajaa ei saanut päälle vauhdissa.

Vektorisäätö nopeuttaa hidastusta nostamalla moottorin magnetointitasoa tarvittaessa hidastusrampin rajoittamisen sijaan. Mekaanisen järjestelmän energia muutetaan moottorissa lämpöenergiaksi lisäämällä moottorin vuota./1./

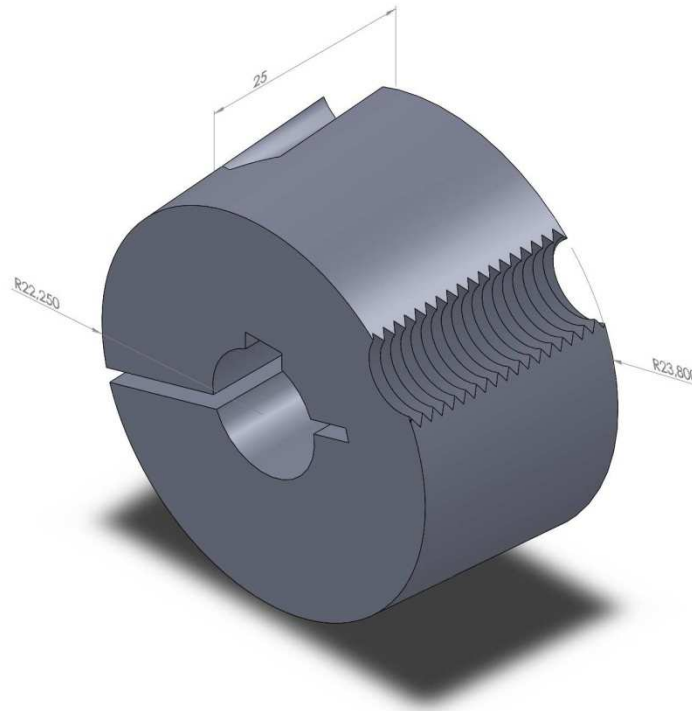
DC-jarrutuksessa moottoriin syötetään tasavirtaa, joka aiheuttaa paikallaan olevan magneettikentän, joka jarruttaa pyörivää roottoria./1/.

Taajuusmuuttajat löytyivät varastosta, joten niiden hintaa ei ole laskettu servotesti-penkin lopulliseen hintaan.

Servomoottorin testauslaite olisi toiminut paremmin, jos oikosulkumoottoria olisi käy-tetty generaattorina. Magnetoinnin olisi voinut hoitaa kondensaattoreilla ja generaatto-rille olisi pitänyt laittaa jotain vastukseksi.

### 5.3 Kartioholkit

Oikosulkumoottorille ja pienille servomoottoreille tarvitsimme 1210/14 taper lock kartioholkkeja. Testatulle isommalle servolle käytimme 1210/32 kartioholkkia./6/ Kartioholkeissa ensimmäinen luku kertoo kartioholkin tyypin ja toinen luku kartioholkin sisähalkaisijan. /6/ Kuvassa 20 on kuva kartioholkista.



**KUVA 20. Kartioholkki**

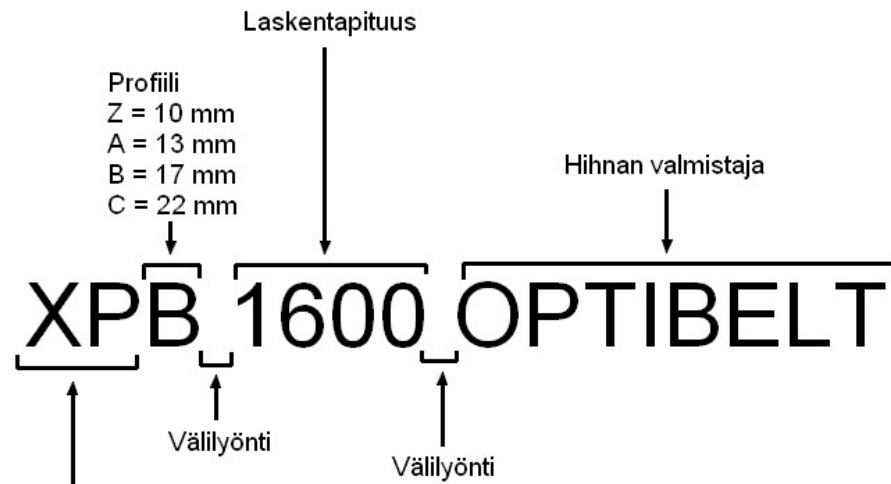
Kartioholkkeja ja hihnapyöriä ei saanut pohjaan asti osumatta servopenkkiin. Kartioholkit kiristettiin kiristämällä 2 laitimmaista ruuvia, joiden kierteet olivat hihnapyörässä. Keskimäinen kartioholkin kierteinen reikä oli kartioholkin akselista irrottamista varten.

### 5.4 Hihna

Hihnan pituus laskettiin kaavalla  $\pi * 80mm + 2 * 328,61mm = 908,5mm$ , jossa 80mm oli hihnapyörän halkaisija ja 328,61 oli akselien välimatka. Hihnalle piti antaa vähän lisäpituutta kiristimen ja vaihtuvien akselien takia. Servot, joiden akselit ovat yli 32mm halkaisijaltaan, tarvitsevat seuraavan koon SPA-kiilahihnapyörän.

Hihnaksi valittiin SPA 932 Optibelt kiilahihna, jonka jakopituus oli 932mm ja ulkopituus 944mm. Hihnan leveämpi pää oli 13mm, koska hihna oli profiilia A. Hihna ei ollut hammastettu, minkä kertoo ensimmäinen kirjain hihnan nimessä. Kuvassa 21 näkyy hihnan tyypit.

Hakuesimerkki: Optibeltin B profiilin 1600 millinen hammastettu kiilahihna löytyy koodilla XPB 1600 OPTIBELT



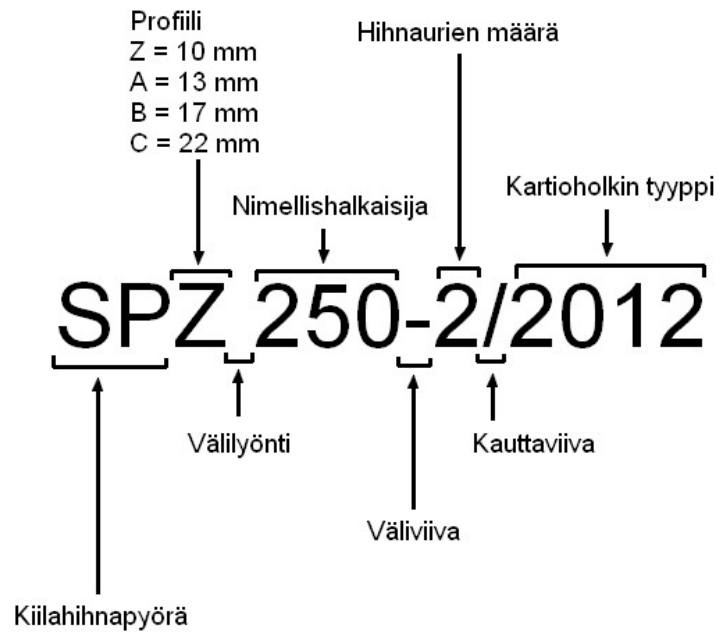
Hammastettu kiilahihna  
Vaihtoehtoisesti SPB hammastamaton hihna  
Me varastoimme hammastettua sen  
etuisuuksien vuoksi:  
- parempi tehonsiirto arvo  
- taipuu pienemmälle pyörälle  
- ilmajäähditys

## KUVA 21. Hihnatyypit/6/

### 5.5 Hihnapyörä

Hihnapyöräksi valittiin 2 kpl:tta SPA 080-1/1210 kiilahihnapyörää. 1210 tyyppin kartioholkeille käy 11-32mm akselikoot, jos akselikoko kasvaa pitää vaihtaa kartioholkit ja hihnapyörä isomman kokoiseksi. Profiili määräytyi hihnan mukaan ja hihnauria tarvittiin vain 1. Kuvassa 22 näkyy hihnapyörien tyypit.

Hakuesimerkki: Z profiilin kiilahihnalle 2-urainen 250 millinen kiilahihnapyörä löytyy koodilla SPZ 250-2/2012



### KUVA 22. Hihnapyörätyypit /6/

Isoin servo, mikä oli varastossa, oli 32mm akselilla ja pienin 14mm akselilla, joihin kaikkiin 1210 kartioholkki ja hihnapyörätyypit kävivät. Hihnapyörät kiristettiin tavallisilla kuusiokoloilla, koska vaikka työpaikalla oli momenttiavain, niin työpaikalla ei ollut mitään hylsyjä avaimeen. Kuvassa 23 on hihnapyörä, jossa on kartioholkille kartion muotoinen reikä.

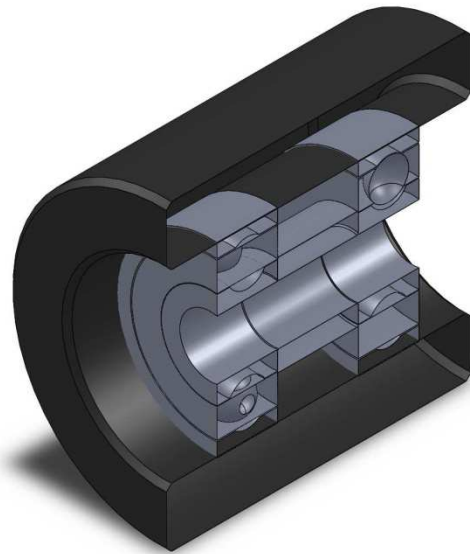


**KUVA 23. Hihnapyörä.**

## 5.6 Hihnankiristin

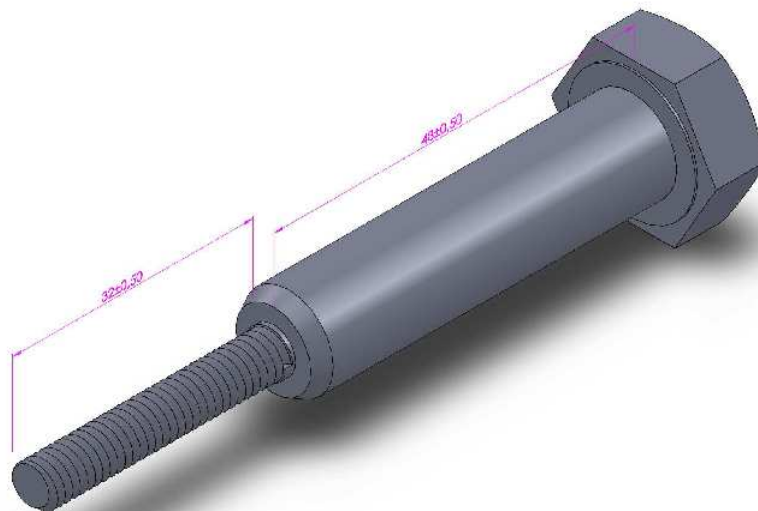
Kysyin ensin kartioholkkien myyjältä jotain hihnankiristimeksi sopivaa, ja vastaus oli laakeri. Seuraavaksi tarvitsin laakerille akselin, ja akselia ei heiltä löytynyt ja sanoivat, että täytyy melko varmasti koneistaa. Sitten menin kysymään laakeriliikkeestä, löytyisikö heiltä mitään akseliksi sopivaa servopenkille, ja heillä oli parempi ratkaisu hihnankiristimeksi.

Hihnankiristimenä käytettiin muovista lieriötä, jonka sisällä oli 2 laakeria, joiden välissä oli holkki. Hihnankiristimen mukana tuli myös päätyholkki, joka kavennettiin 14mm:ksi. Sisällä olevat laakerit ja holkki olivat 12mm halkaisijaltaan. Muovinen lieriö oli 60mm leveä, jossa laakerit olivat 12mm:n päässä lieriön päistä. Muovisen lieriön sisähalkaisija oli 37mm ja ulkohalkaisija 60mm. Kuvassa 24 näkyy hihnankiristin.



**KUVA 24. Hihnankiristin**

Koneistettuun testuslaitteeseen oli tehty M6-kierteet, joten testipenkkiä varten piti tehdä M12-pultti M6-kierteillä. M6-pultin jako 1mm, korkein kohta 5,974-5,794 mm ja matalin kohta 4,891-4,596mm. Pulttien ja mutterien kierteet ovat liitteessä 8. Kuvassa 25 on M12-pultti M6-kierteillä.



**KUVA 25. M12 pultti M6 kierteillä**

### 5.6.1 Laakerit

Laakereille ilmoitetaan vierintäväsymiset, kuormitukset ja rajoittavat nopeudet. Yksirivisen urakuulalaakerin vierintäväsymisen mitoituksessa lasketaan valittavalta laakerilta vaadittava väsymisvoimaluku  $C$  tai valitun laakerin nimellinen kestoikä  $L_{10}$ . Kuormitus (tehollisvoima) on  $P$ . Väsymisvoimaluku  $C$  (dynaaminen kantavuusluku) ilmaisee kuormitusvoiman, jolla laakerin nimelliskestoikä on  $10^6$  kierrosta. /4./

Laakerien vierintäväsymiset lasketaan kaavoilla 43 ja 44. Laakereille ilmoitetaan väsymisvoimaluvut laakerien datalehdissä.

$$C \geq L_{10}^{1/P} \quad (43)$$

$$L_{10} = (C/P)^P \quad (44)$$

Hihnankiristimen yksiriviset urakuulalaakerit olivat tyyppiä 6301-2Z SKF. Laakerien dynaaminen väsymisvoimaluku oli 8,19 kN ja staattinen 4,05 kN. Nopeusrajoitus laakereilla oli 22000 rpm.

Tehollisvoima  $P$  on todellisten säteis- ja aksiaalivoimien väsytyksellinen keskiarvo mitoitusiän aikana. Se saadaan suoraan jos säteis- ja aksiaalivoimat eivät muutu koko aikana: /4./

$$\text{Vapaa laakeri: } P = F_r \quad (45)$$

$$\text{Ohjaava laakeri: } P = X * F_r + Y * F_a \quad (46)$$

Servotestipenkissä ohjaava laakeri oli servotestipenkin peltilevyä lähempänä oleva laakeri. Voimia laakereille ei mitattu, mutta jos oletetaan, että voima  $P = 100 \text{ N}$ , niin laakerin käyttöikä olisi  $L_{10} = (4050/100)^{100} = 40,5^{100}$  kierrosta. Oikeassa laakerissa voimat vaihtelevat ja sisältävät sekä aksiaali- että säteisvoimia.

Laakereille voi myös laskea pyörimisvastuksen näennäisellä kitkakertoimella  $\mu^*$ . Yksirivisen urakuulalaakerin näennäiskitkakerroin on välillä 0,0015-0,003. Silloin kun kaavan 47 kuormitusvoimien resultantti, pyörimisnopeus  $\approx 0,5 n_{max}$  ja voitelu on hyvä, niin vastusmomentti  $T_\mu$  (Nmm) saadaan kaavalla 48./4./

$$F = (F_r^2 + F_a^2)^{0,5} \approx 0,1 C \quad (47)$$

$$T_\mu \approx \frac{\mu^* F d}{2} \quad (48)$$

$\mu^*$  = Näennäinen kitkakerroin

$d$  = Laakerin akselihalkaisija

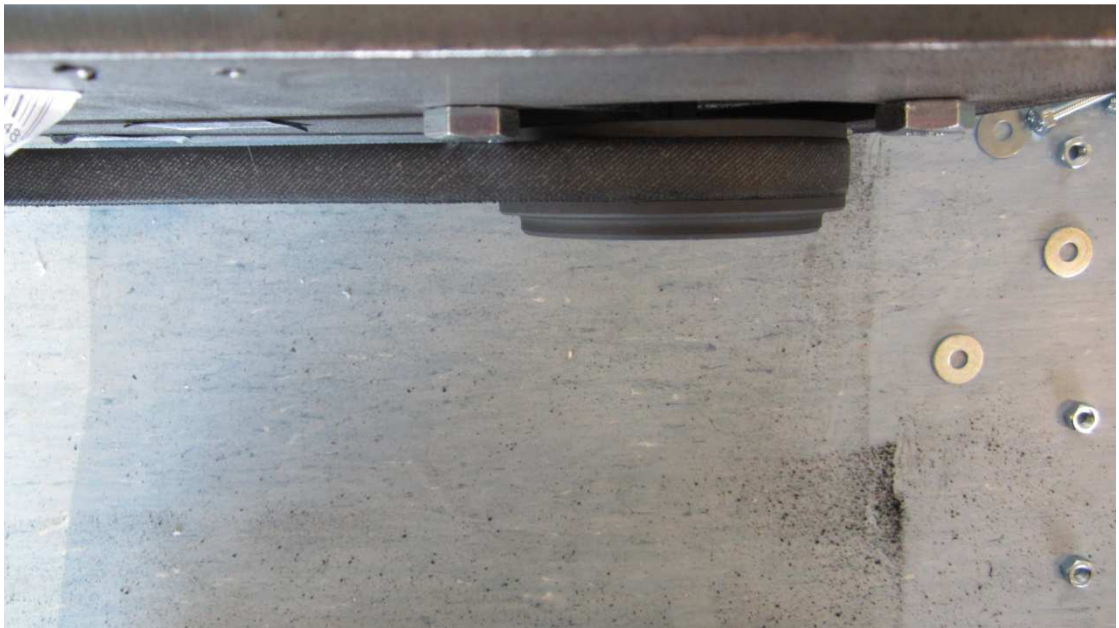
Näillä tiedoilla laskettuna laakerin 6301-2Z SKF pyörimisvastus pyöriessä on

$$T_\mu \approx \frac{0,003 \cdot 100 \cdot 12}{2} = 1,8 \text{ Nmm. Näennäinen kitkakerroin } \mu^* \text{ on kaksinkertainen käynnistyessä. /4./}$$

## 5.7 Servopenkki

Kuva valmistuneesta servopenkistä on liitteessä 2 ja kuva korjatusta liitteissä 3 ja 4. Käytin Draftsight-nimistä ilmaista CAD-ohjelmaa servomoottorin testauslaitteen piirtämiseen. Ainoastaan PDF:n tulostus on tehty autocadin student versiolla.

Ensimmäisessä servopenkissä vikana oli pellin paksuus pienten servomoottoreiden ja oikosulkumoottorin kohdalla. Kuvassa 26 näkyy oikosulkumoottorin kartioholkki, joka on melkein pellissä kiinni, vaikka sitä ei ole laitettu pohjaan asti.



**KUVA 26. Oikosulkumoottorin hihnapyörä**



Servopenkkiin piti myös tehdä polykarbonaatista saranoitu suoja mahdollisia hinnan hajoamisia varten. Suoja valmistettiin 3mm:n polykarbonaattilevyistä, jotka liitettiin yhteen kulmarauodoilla. Suojassa oli katto, laidat ja etusivu. Suoja oli 506mm leveä, 200mm syvä ja 203mm korkea. Suoja oli saranoitu metallilevyyn, niin että saranat osoittivat samaan suuntaan, eli sen sai helposti irti saranoistaan. Kuvassa 27 on koneistettu pelti polykarbonaatti suojalla.



**KUVA 27. Testilaitte**

Korjattuun testauslaitteeseen koneistamo ottaa oikosulkumoottorin kohdalta 6 mm pellistä pois ja servomoottorien kohdalta 156\*156 mm:n alueelta 6 mm pois. Kulmien pyöristyksellä ei ollut väliä servon kohdalla, joten pyöristyksen suuruudesta ei ole tietoa.

## **5.8 Servomoottori**

Servomoottorina käytettiin Siemensin 1FT6086-1AF71-3AG1 servomoottoria. Servomoottorin datalehti on monisivuisessa liitteessä 1. Servomoottori kytkettiin Masterdrives mc DC/AC 6SE7014-0TP60-Z servodriveen.

## 5.9 Servodrive

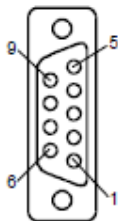
Servomootoria ajettiin servodrivella, jota ohjattiin kannettavalla, jolle oli asennettu ilmainen drivemonitor-ohjelma. /9./

600 V:n tasajännite tuotiin kiskoilla laitteen yläpuolelle Masterdrives AC/AC 6SE7018-0EP60 invertteriltä. 24V DC-jännite tuotiin ulkoiselta 24V jännitelähteeltä. Ilman 24V ohjauspiirinjännitettä drive ei toiminut./9./

Laitetta ohjattiin RS232-sarjaliikennekaapelilla, jonka servodriveen kytkettävä pää ei ollut standardin mukainen RS232-pää. Tavallisessa RS232-sarjaliikennekaapelissa RxD ja TxD menevät ristiin, ja ne ovat pinneissä 2 ja 3. Siemensin sarjaliikennekaapelissa 7:ssä oli datanlähetyks, joten servodrive ei lähettänyt dataa tietokoneelle tavallisella RS232-kaapelilla.

Seuraavaksi servodriveen piti laittaa parametrit ajettavalle moottorille. Aluksi nostin sarjaliikenneväylän baud raten korkeammaksi, koska parametrien lukemisessa ja kirjoittamisessa meni muuten liian kauan. Seuraavaksi otimme driven parametrit tietokoneelle talteen ja nollasimme laitteen alkuperäisasetuksiin.

### X103 - Serial interface

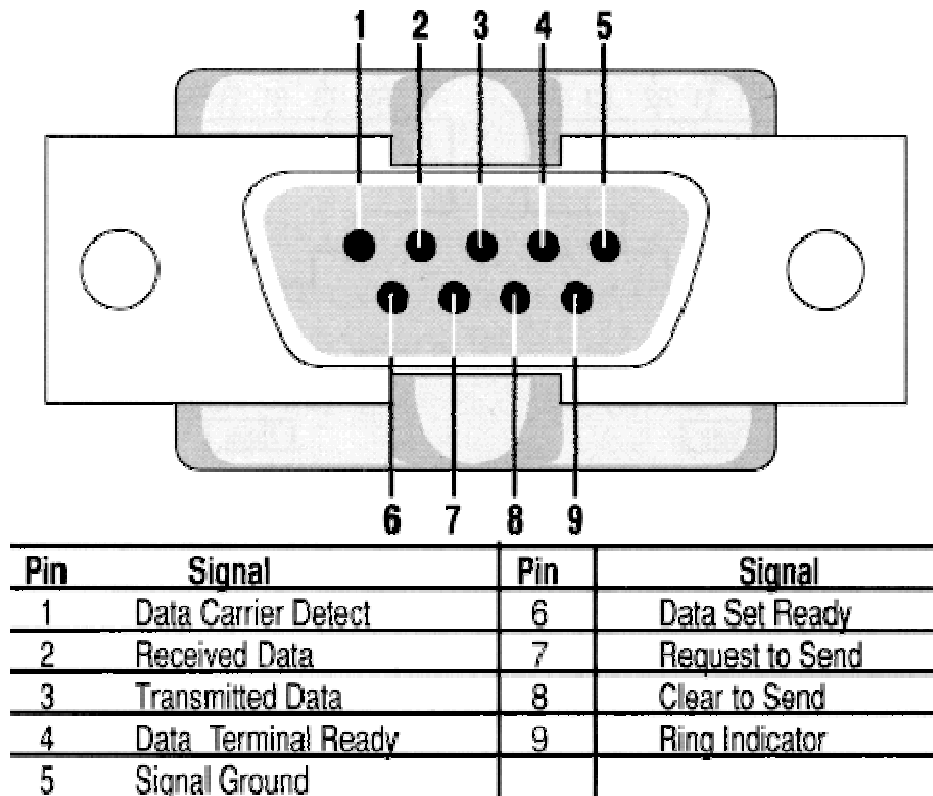


It is possible to connect either an OP1S or a PC with RS232 or RS485 serial interface via the 9-pole SUB D socket. There are different connecting cables for the PC for the various transmission protocols. The 9-pole SUB D socket is internally coupled with the USS bus, thus enabling data exchange with other nodes linked via the USS bus. This interface is also used for loading software.

Pin	Designation	Meaning	Range
1	RS232 ID	Changeover to RS232 protocol	Low active
2	RS232 RxD	Receive data via RS232	RS232
3	RS485 P	Data via RS485 interface	RS485
4	Boot	Control signal for software update	Low active
5	M5 AUX	Reference potential to P5V	0 V
6	P5V	5 V aux. voltage supply	+5 V, max. 200 mA
7	RS232 TxD	Transmit data via RS232	RS232
8	RS485 N	Data via RS485 interface	RS485
9	M_RS232/485	Digital ground (choked)	

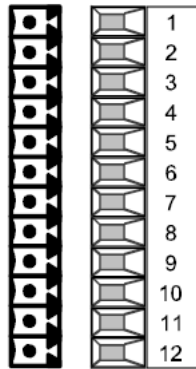
Table 7-8 Serial interface

### KUVA 28. Siemensin sarjaliikennekaapeli taulukko/9/



**KUVA 29. RS232 kaapeli**

Parametrit kirjoitettiin ohjelman assisted commissioning valikkoa hyväksikäyttäen. Assisted commissioning valikossa laitettiin aluksi moottorin nimellisarvot, maksimi-arvot, napaparien lukumäärä ja anturin tyyppi ja pulssimäärä. Seuraavaksi tuli PIsäätö moottorin nopeudelle tai momentille, joista valitsimme nopeuden. Viimeisenä määritettiin X101 liittimen toiminnot. Kuvassa 30 on liitin johon toiminnot määritettiin ja taulukossa 3 on liittimelle määritetyt toiminnot.



Terminal	Designation	Meaning	Range
1	P24 AUX	Aux. voltage supply	DC 24 V / 60 mA
2	M24 AUX	Reference potential	0 V
3	DIO1	Digital input/output 1	24 V, 10 mA / 20 mA
4	DIO2	Digital input/output 2	24 V, 10 mA / 20 mA
5	DIO3	Digital input/output 3	24 V, 10 mA / 20 mA
6	DIO4	Digital input/output 4	24 V, 10 mA / 20 mA
7	DI5	Digital input 5	24 V, 10 mA
8	DI6	Digital input 6	24 V, 10 mA
9	AI+	Analog input +	11 bit + sign differential input:
10	AI-	Analog input -	$\pm 10 \text{ V} / R_i = 40 \text{ k}\Omega$
11	AO	Analog output	11 bit + sign $\pm 10 \text{ V} / 5 \text{ mA}$
12	MAO	Ground analog output	

Connectable cross-section: 1.5 mm<sup>2</sup> (AWG 16)

Terminal 1 is at the top when installed.

Table 7-6 Control terminal strip

### KUVA 30 Servodriven liitin.

### TAULUKKO 3. Liittimelle asetetut toiminnot.

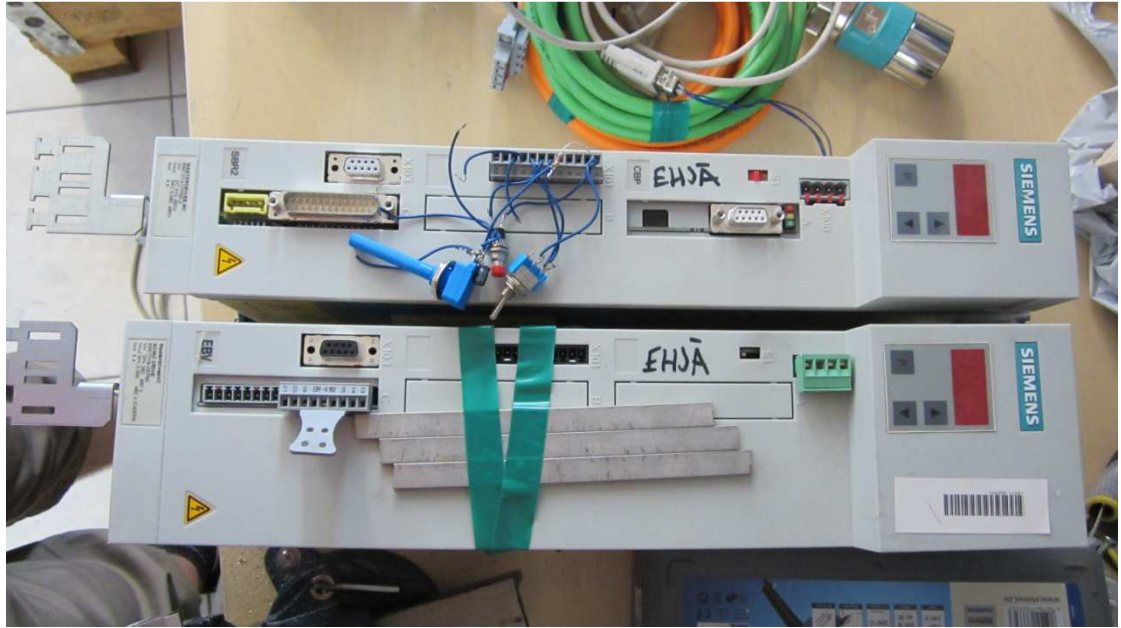
Terminaali	Toiminto	Jännitealue
1	24V jännite inpueteille	24V
6	Kytkin kytkee servon päälle	24V
7	Fault reset	24V
8	Kytkin kytkee moottorin pyörimään	24V
9	Nopeussäätö + (Nopeuden ohjaustieto)	10V
10	Nopeussäätö - (Moottorin nopeustieto)	10V
11	Analogi ulostulo (Moottorin nopeustieto)	10V
12	Nopeussäätö maa	0V

Aluksi parametrien laitton jälkeen servodrive antoi F051 ilmoituksen, joka tarkoitti encoder faulttia. Seuraavaksi purin servomoottorin encoderin kuoren ja servon encoderi ei ollut kytketty mihinkään kiinni. Vian selvittämisen jälkeen moottori lähti pyö-

rimään, mutta nopeussäätö ei koskaan toiminut ja moottorin momenttilukemat olivat järjettömiä. Moottori ilmoitti nopeudeksi 3250 rpm.

Moottorin momenttilukemat näyttivät 28 % nimellismomentista ja moottorin nimellismomentti oli 18 Nm. Oikosulkumoottorin käyttö ei vaikuttanut momenttilukemiin.

Kuvassa 31 on testipenkissä käytetty drive ja invertteri.



**KUVA 31. Servodrive ja invertteri.**

### 5.10 Suojaukset

Laitetta käytettiin 3-vaiheisella suojaerotusmuuntajalla, jossa oli vaiheilla C10 johdonsuojakatkaisijat ja 50mA vikavirtasuoja. Servodrivein 600 V kiskoilla olevan tasajännitteen olisi voinut myös suojata asentamalla servodrivein pöydän sisään, mutta pöytä ei koskaan valmistunut.

### 5.11 Pöytä

Pöytälevystä on piirros liitteessä 6. Pöytälevyn mitat ovat 500\*500mm ja pöydän korkeus on 800mm. Levyyn tulee alapuolelle vahvikkeita laudoista servotestipenkin alapuolelle.

Mahdollisesti pöytälevyyn voisi vielä rakentaa kierretangosta nostimen isoille servomootoreille. Myös servodrivien ja invertterin voisi kiinnittää pöydän alapuolelle levyyn, joka voisi olla pöydässä kiinni liukusaranoilla.

Liitteessä 7 on Solidworks-kuva pöydästä, johon on lisätty kampi servoille ja levy servodrivelle ja invertterille. Servomootorin nostin on piirroksessa tehty M20 kierretangosta, jonka päähän voisi laittaa jonkinlaisen t-vääntimen tai kammen.

Pöydän pinta-alaa voisi myös kasvattaa 500\*500 mm:stä hieman isommaksi, jolloin taajuusmuuttajalle ja testilaitteestoon liitettävälle kannettavalla jäisi lisätilaa. Myös servodrivet voisi laittaa pöydälle ja niiden välipiirin kiskot voisi helposti suojata laittamalla välipiirin kiskot oman muovisuojan alle.

Pöytälevyä ei saanut valmiiksi, koska puutavaraliikkeellä oli saha rikki ja korjauksesta ei ollut tietoa. Laudat sain sieltä jaloiksi ja vahvikkeiksi hommattua.

## **6 PÄÄTELMÄT**

Opinnäytetyölle annettiin 2 kuukautta aikaa valmistua, ja sen aikana piti tehdä myös "oikeita" töitä. Vaatimukset rakennukselle olivat halpa, toimiva ja kompakti. Koko rakennukselle tuli hintaa hieman vajaa 700€ ja kooltaan paljon kompaktimpaa ei pysty rakentamaan.

Viimeisellä viikolla koneistettu pelti tuli ja sain silloin myös servomootorin ja driven testattavaksi.

Servon ja driven jostain syystä oletettiin toimivan, vaikka niitä oli työkaveri testannut huonolla menestyksellä. Servodrivien nopeussäätö ei toiminut ollenkaan ja servomootoristakin puuttui enkooderi aluksi.

Drive ei antanut moottorille minkäänlaisia nopeusohjeita ja momenttilukematkin olivat järjettömät.

Taajuusmuuttajalla ajettu oikosulkumoottori ei jarruttanut isoja servoja ollenkaan. Generaattorikäyttöisenä moottori olisi saattanut toimia parempana vastamomenttina

servoille. Kondensaattoreilla olisi voinut hoitaa magnetoinnin. Moottori oli myös reilusti alimitoitettu. Moottoriksi tilattiin halvin moottori, mikä netistä löytyi, koska jarrutusominaisuutta ei pidetty niin tärkeänä.

## LÄHTEET

1. ABB ACS510 manuaali
2. Airila Mauno 2011. Mekatroniikka. Helsinki: Otatieto
3. Lauri Aura, Antti J. Tonteri. 1998. Teoreettinen sähkötekniikka. Helsinki: WSOY
4. Seppo Blom 2006. Koneenelimet ja mekanismit. Helsinki: Edita
5. <http://tuotteet.etra.fi/> Etra 2013. Tuotteet. Www-dokumentti. linkki. päivitetty 18.10.2013. Luettu 18.10.2013.
6. <http://www.laakeriteam.fi/> Laakeriteam 2013. Tuotteet. Www-dokumentti. linkki. päivitetty 18.10.2013. Luettu 18.10.2013.
7. Jari Savolainen, Reijo Vaitinen. 1999. Sääätötekniikan perusteita. Saarijärvi: Gummerus
8. <http://oikosulkumoottorit.wikispaces.com/3-vaihe+oikosulkumoottorin+rakenne> Www-dokumentti. linkki. päivitetty 18.10.2013. Luettu 18.10.2013.
8. <http://www.skf.com/> SKF 2013. Tuotteet. Www-dokumentti. linkki. päivitetty 18.10.2013. Luettu 18.10.2013.
9. 1997 ,SIMOVERT MASTERDRIVES Motion Control Frequency Inverter (DC-AC) Compact PLUS Type
10. 2008, SIMOVERT MASTERDRIVES Motion Control Frequency Converter (AC-AC) Compact PLUS Type
11. 2004, Sinamics synchronous servomotors 1FT6.
12. <http://julioterra.com/journal/2013/01/> Www-dokumentti. linkki. päivitetty 18.10.2013. Luettu 18.10.2013.





## Kartioholkki-taulukko

Kartioholkki ulkohalkaisija ja syvyys/sisähalkaisija

Nimi	Ulkohalkaisija mm	Sisähalkaisija (x) mm	syvyys (mm)	Kirstysmomentti (Nm)	Momentti ilman kiliaa (Nm)	Momentti kilialla (Nm)
1008/x	35,2	9-25	22,2	6	16-69	147
1108/x	38,4	9-28	22,2	6	16-69	147
1210/x	47,6	11-32	25,4	20	56-180	407
1215/x	47,6	14-32	38,1	20	71-180	407
1310/x	50,8	14-35	25,4	20	59-210	435
1610/x	57,2	14-42	25,4	20	72-265	486
1615/x	57,2	14-42	38,1	20	72-265	486
2012/x	69,9	14-50	31,8	32	96-420	808
2517/x	85,7	16-65	44,5	49	147-754	1311
3020/x	108	25-75	50,8	90	315-1300	2712
3030/x	108	35-75	76,2	90	442-1300	2712
3525/x	127	32-100	63,5	115	524-2505	5062
3535/x	127	38-95	89	115	630-2425	5062
4030/x	146	40-76,2	76,2	170	1036-3975	8735
4040/x	146	40-100	102	170	1036-3460	8735
4535/x	161	55-120	89	190	1840-5580	12430
4545/x	161	55-110	114	190	1840-4950	12430
5040/x	178	80-125	101,6	270	3520-5900	14238
5050/x	178	100	127	270	4800	14238

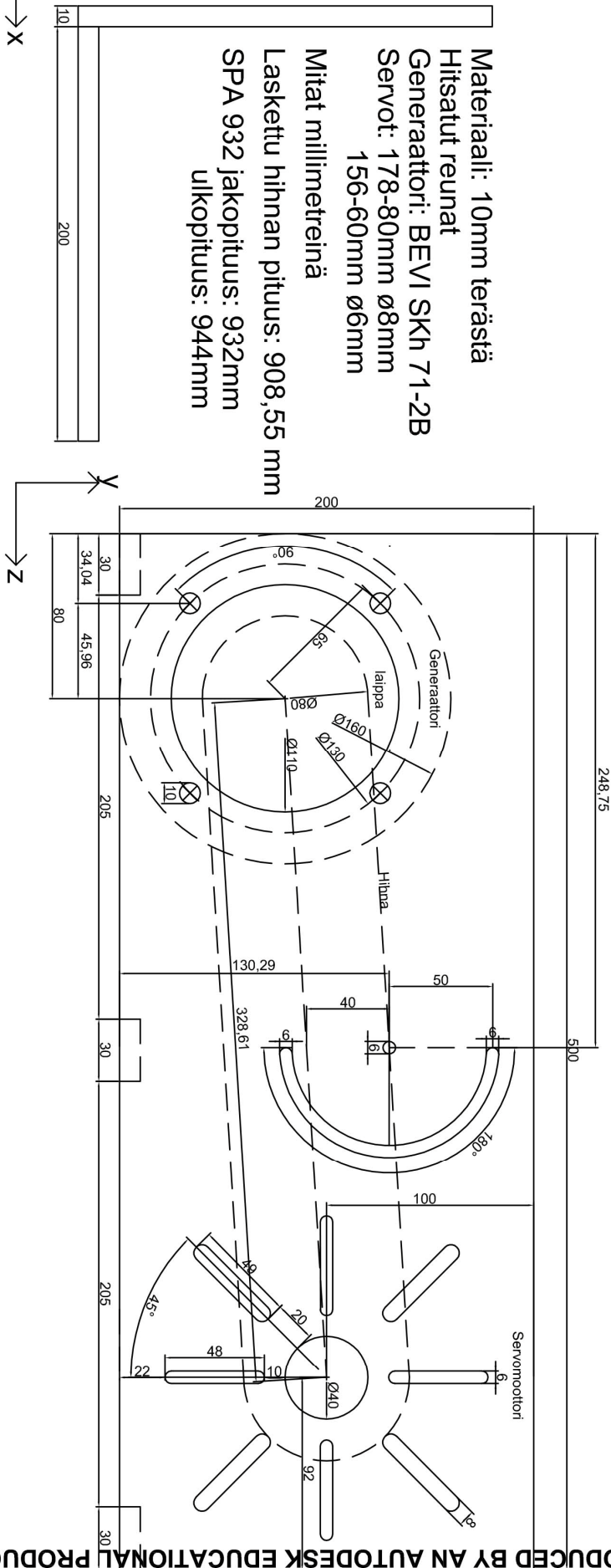
1210/14 = 2

1210/30 = 1

1210/32 = 1

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

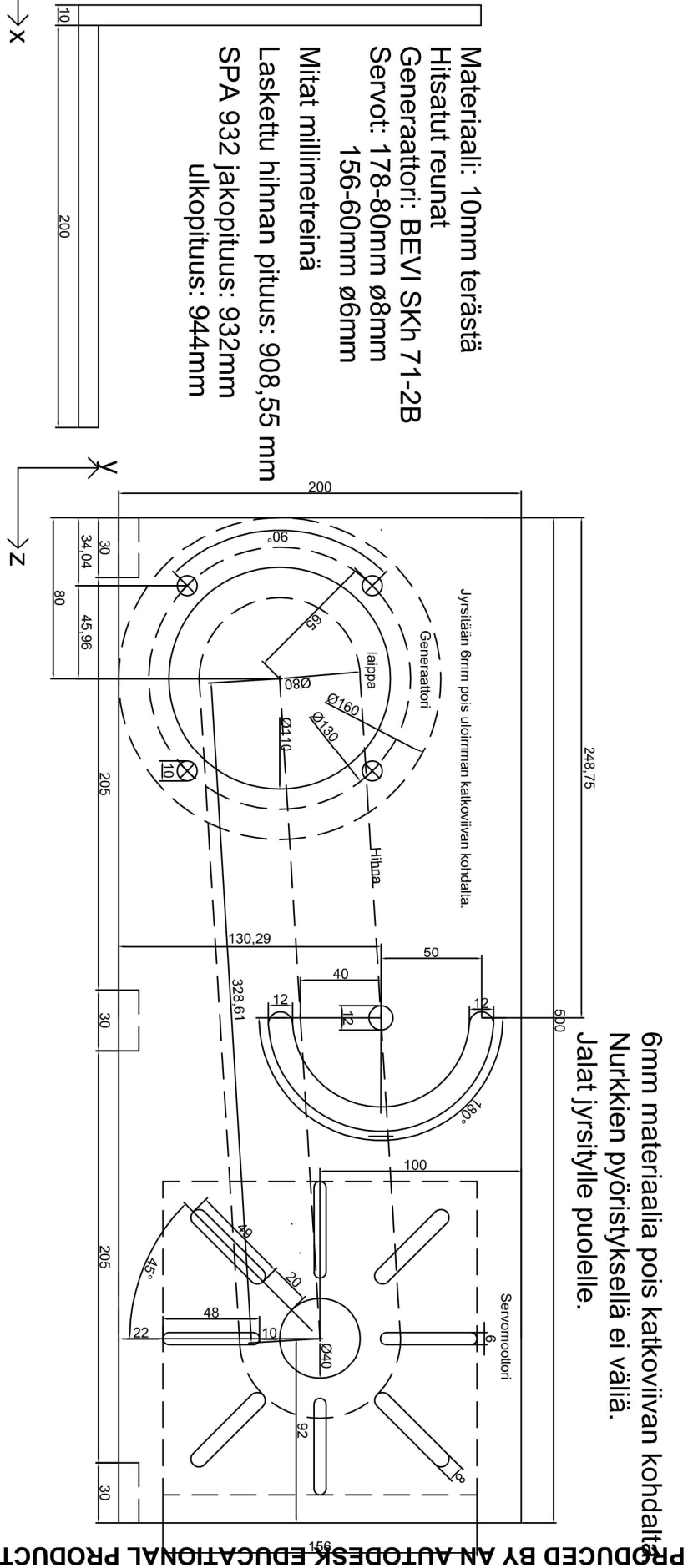
Materiaali: 10mm teräsiä  
 Hitsatut reunat  
 Generaattori: BEVI SKh 71-2B  
 Servot: 178-80mm  $\varnothing$ 8mm  
 156-60mm  $\varnothing$ 6mm  
 Mitat millimetreinä  
 Laskettu hinnan pituus: 908,55 mm  
 SPA 932 jakopituus: 932mm  
 ulkopituus: 944mm

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Korjattu koneistetun pellin piirustus

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

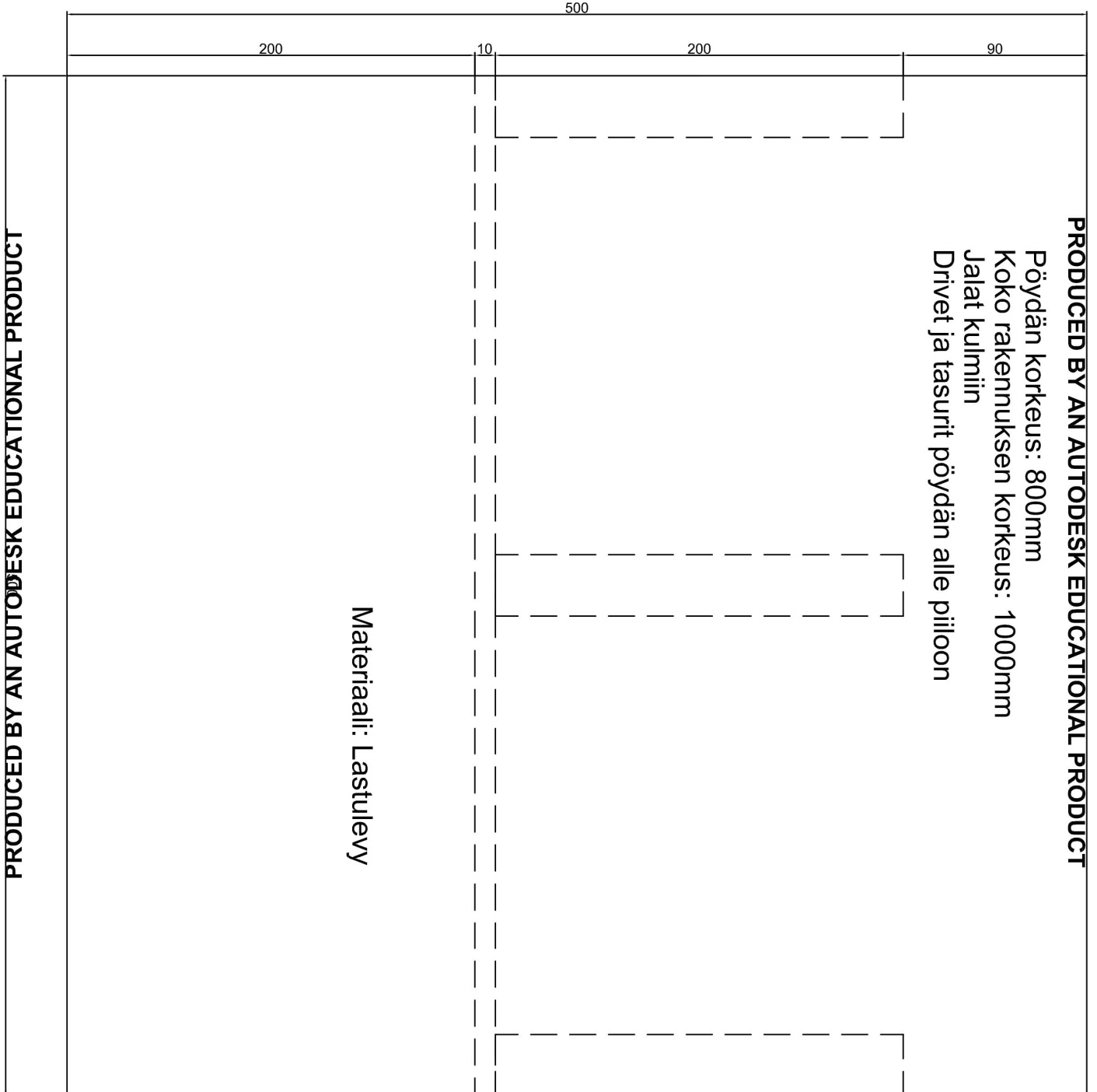
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT







## Pulttikokojen kierteet

Pultti					
Koko	Jako	Korkein kohta	Matalin kohta	Pultin pään korkeus	Avainkoko
M3	0,5	2,980-2,874	2,439-2,272	2,125	5,5
M4	0,7	3,978-3,838	3,220-3,002	2,925	7
M5	0,8	4,976-4,826	3,869-4,110	3,65	8
M6	1	5,974-5,794	4,891-4,596	4,15	10
M8	1,25	7,972-7,760	6,272-6,619	5,65	13
M10	1,5	9,968-9,732	8,344-7,938	7,18	17
M12	1,75	11,966-11,701	10,072-9,601	8,18	19
M16	2	15,962-15,682	13,797-13,271	10,18	24
M20	2,5	19,958-19,623	17,252-16,624	13,215	30
M24	3	23,952-23,577	20,701-19,955	15,215	36
M30	3,5	29,947-29,522	26,158-25,306	19,26	46
M36	4	35,940-35,465	31,610-30,654	23,26	55

Mutteri				
Koko	Jako	Korkein kohta	Matalin kohta	Mutterin korkeus
M3	0,5	3	2,599-2,459	2,4
M4	0,7	4	3,422-3,242	3,2
M5	0,8	5	4,334-4,134	4
M6	1	6	5,153-4,917	5
M8	1,25	8	6,912-6,647	6,5
M10	1,5	10	8,676-8,376	8
M12	1,75	12	10,441-10,106	10
M16	2	16	14,210-13,835	13
M20	2,5	20	17,744-17,294	16
M24	3	24	21,252-20,752	19
M30	3,5	30	26,771-26,211	24
M36	4	36	32,27-31,67	29

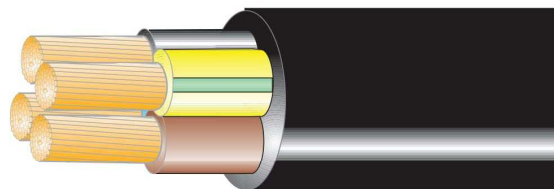




Energy & Infrastructure | Europe

20110314

## DRAKAFLEX H07RN-F 450/750 V



### Application fields

A highly flexible weather- and oil-resistant cable. For use where the mechanical stress have medium hard character, in spaces with explosion risks or dry and humid spaces. Outdoors e.g. in agricultural buildings and for temporary installations in working sites. Also for fixed installation in temporary buildings and cabins. Use up to 1000 V AC is permitted for fixed, protected installation (in conduit or appliances) and also for motor connections of hoisting motors and the like. Max direct voltage 742/1238 V DC.

### Standard

SS 424 02 35-4

### Fire propagation class

F2 acc. to SS 424 14 75  
and IEC 60332-1  
and SS-EN 50265-2-1

### Temperature range

In continuous operation  
max. conductor temp 60 °C. The  
cable is flexible down to: -25 °C.

### Approval

< HAR >, C€

### Material declaration

DRAKAFLEX

### Bending radius

6 x overall diameter when flexing  
4 x overall diameter at fixed mounting

### Max tensile stress (N)

Total copper area x 15 N/mm<sup>2</sup>

### Design

Conductor: Flexible and annealed copper acc. to IEC 60228 class 5  
Insulation: EPDM-rubber class EI4  
Core identification:  
1-core: black  
2-core: blue, brown  
3-core: green/yellow, blue, brown  
4-core: green/yellow, brown, black, grey  
5-core: green/yellow, blue, brown, black, grey  
7-core: green/yellow, 6 cores black number-marked 1-6  
Sheath: Weather- and oil-resistant rubber, class EM2  
Marking e.g.: DRAKAFLEX H07RN-F 450/750 V 5G1,5 mm<sup>2</sup> <HAR>

Number of cores x cross-section of conductor mm <sup>2</sup>	Overall diameter (approx.) mm	Weight (approx.) kg/100 m	Standard delivery length m	Standard drum size /Package	E-nr
1X1,5	6,0	5,0	500	K5	952501080205
1X6	8,6	11,4	500	K6	952501120205
1X10	10,5	19,5	500	K6	952501100205
1X16	11,7	24,9	1000	K8	952501140206
1X35	14	50,1	500	K8	952501160205
1X50	18	71,6	500	K8	952501170205
1X70	21	99,9	500	K9	952501180205
1X95	23	127,0	500	K11	952501190205
1X120	26	154,1	500	K11	952501200205
1X150	29	193,0	500	K12	952501210205
1X185	32	235,1	*	*	952501220298
1X240	34	289,2	*	*	952501230298
2x1	8,3	9,4	100	Coil	952502070202
2x1	8,3	9,4	500	K6	952502070205

Dimension Drawings

5.3 1FT6 without DRIVE-CLiQ

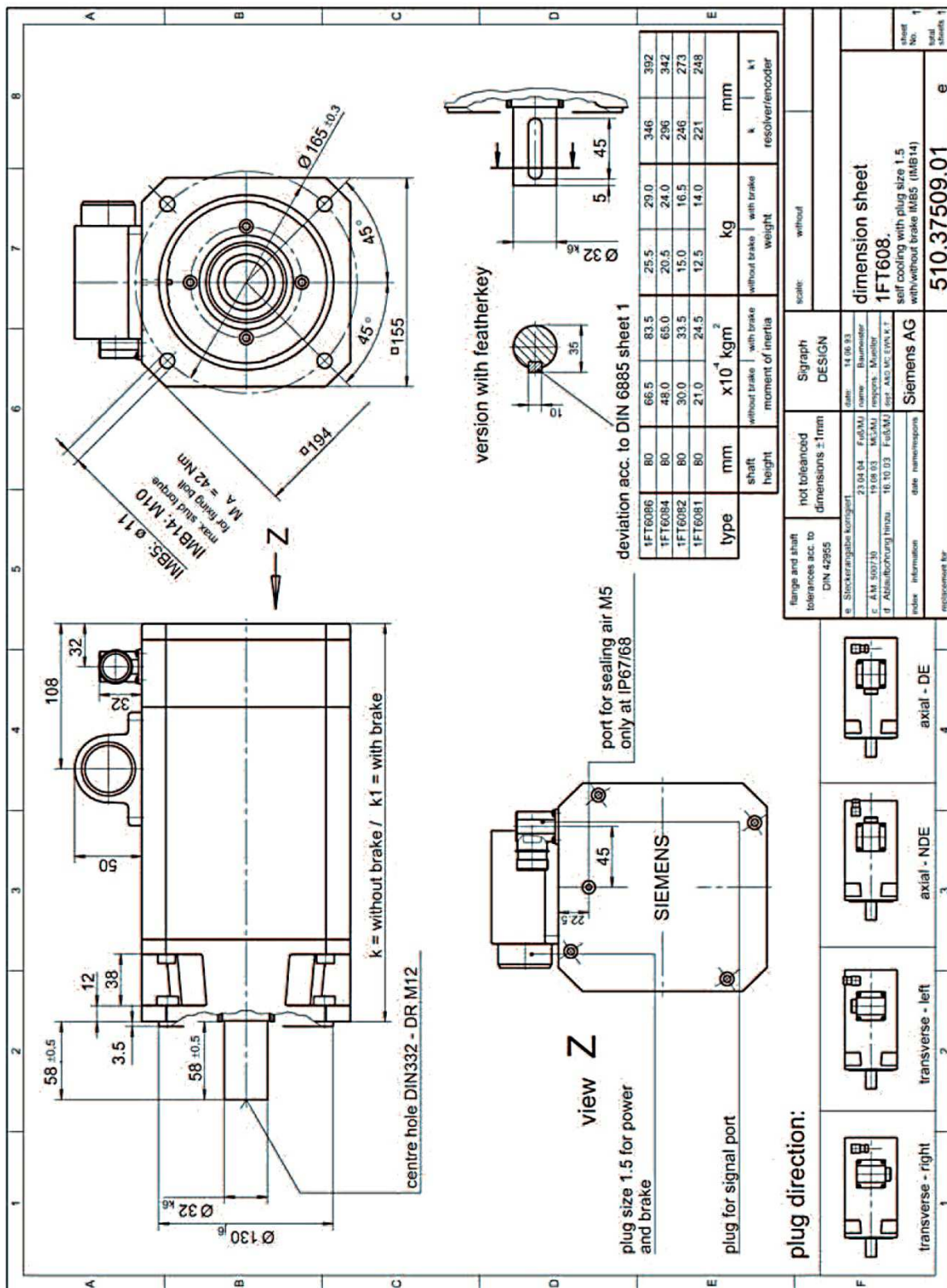


Figure 5-21 1FT608□ non-ventilated with connector, Size 1.5

## Technical Data and Characteristics

## Speed-torque diagrams

Table 3-20 1FT6086 natural cooling

1FT6086					
Technical data	Code	Units	-□AF7□	-□AH7□	
Engineering data					
Rated speed	$n_N$	rpm	3000	4500	
Number of poles	2p		8	8	
Rated torque (100 K)	$M_{N(100 K)}$	Nm	18.5	12	
Rated current (100K)	$I_N$	A	13	12.6	
Stall torque (60K)	$M_{0(60 K)}$	Nm	22.4	22.4	
Stall torque (100K)	$M_{0(100 K)}$	Nm	27	27	
Stall current (60K)	$I_{0(60 K)}$	A	13.3	18.9	
Stall current (100K)	$I_{0(100 K)}$	A	16.4	23.3	
Moment of inertia (with brake)	$J_{mot}$	$10^{-4}$ kgm <sup>2</sup>	79.6	79.6	
Moment of inertia (without brake)	$J_{mot}$	$10^{-4}$ kgm <sup>2</sup>	66.5	66.5	
Optimum operating point					
Optimum speed	$n_{opt}$	rpm	3000	3500	
Optimum power	$P_{opt}$	kW	5.81	6	
Limiting data					
Max. permissible speed (mech.)	$n_{max}$	rpm	7900	7900	
Maximum torque	$M_{max}$	Nm	90	90	
Maximum current	$I_{max}$	A	71	102	
Physical constants					
Torque constant	$k_T$	Nm/A	1.65	1.16	
Voltage constant	$k_E$	V/1000 rpm	105	74	
Winding resistance at 20 °C	$R_{ph}$	Ohm	0.31	0.15	
Rotating field inductance	$L_D$	mH	3.8	1.8	
Electrical time constant	$T_{el}$	ms	12.3	12	
Shaft torsional stiffness	$c_t$	Nm/rad	65000	65000	
Mechanical time constant	$T_{mech}$	ms	2.3	2.2	
Thermal time constant	$T_{th}$	min	45	45	
Weight with brake	m	kg	29	29	
Weight without brake	m	kg	25.5	25.5	

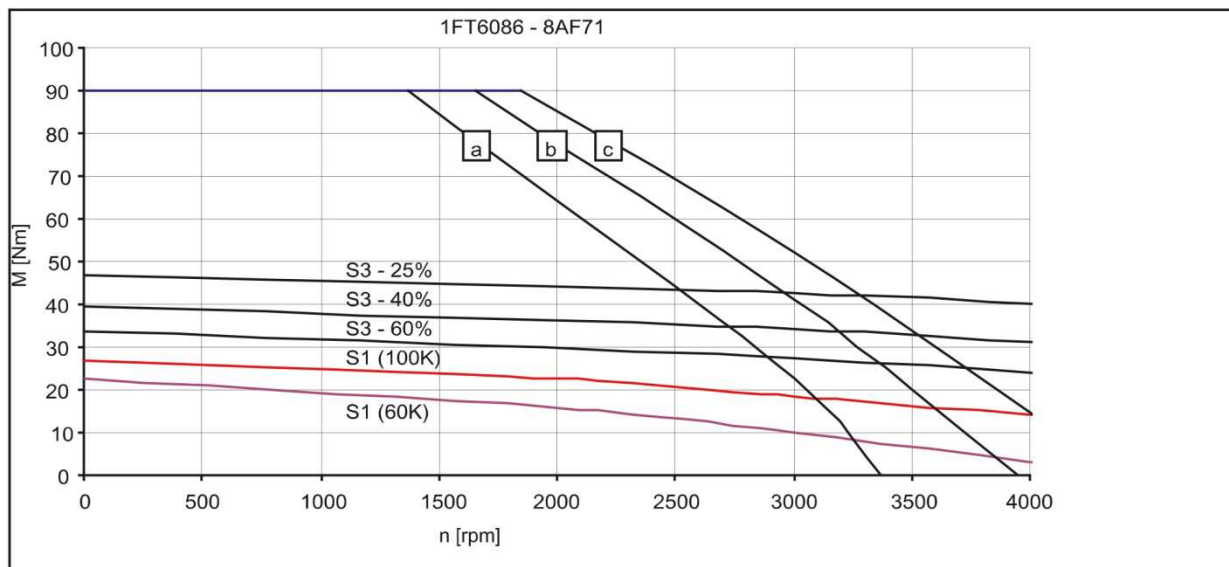


Fig. 3-34 Speed-torque diagram 1FT6086-□AF7□

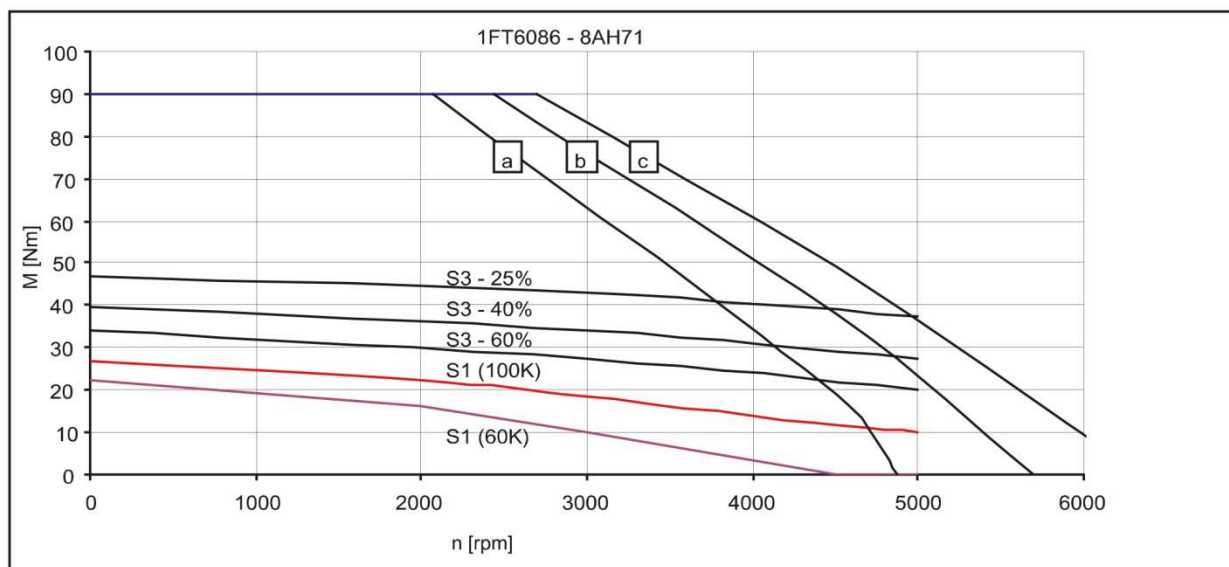


Fig. 3-35 Speed-torque diagram 1FT6086-□AH7□

- [a] MASTERDRIVES MC,  $V_{DC \text{ link}} = 540 \text{ V (DC)}$ ,  $V_{Mot} = 340 V_{rms}$
- [b] SIMODRIVE 611 (UE),  $V_{DC \text{ link}} = 540 \text{ V (DC)}$  and MASTERDRIVES MC (AFE),  $V_{DC \text{ link}} = 600 \text{ V (DC)}$ ,  $V_{Mot} = 380 V_{rms}$
- [c] SIMODRIVE 611 (ER),  $V_{DC \text{ link}} = 600 \text{ V (DC)}$ ,  $V_{Mot} = 425 V_{rms}$